

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**ESTUDI DE LA CLIMATITZACIÓ D'UN CENTRE DE
PROCESSAMENT DE DADES (CPD)**



Memòria i Annexos

Autor: Kamal Bobouh Abakouy
Director: Joan Grau Barceló
Convocatòria: Juny 2017

Resum

En l'interior d'un centre de processament de dades (CPD) es troben diferents equips informàtics i de comunicacions que, com tot aparell electrònic en funcionament, incrementen de temperatura per l'efecte Joule en les parts conductores. Aquest increment de temperatura en els equips crea la necessitat d'un sistema de refrigeració a l'interior del CPD per tal de garantir un correcte funcionament dels equips que l'integren. L'objectiu d'aquest treball serà obtenir la distribució de la temperatura de l'aire a l'interior d'un CPD per a diferents escenaris de climatització fent ús del programari lliure de Dinàmica de Fluids Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) OpenFOAM juntament amb la interfície gràfica d'usuari Helyx-OS. La tipologia de CPD que s'estudia en aquest treball és una BTS (*Base Transceiver Station*).

Primerament es fa una introducció teòrica de les equacions que regeixen la dinàmica de fluids i es segueix amb la descripció de com afrontar els fluxos turbulents. També es realitza una introducció a la llibreria OpenFOAM amb la finalitat de crear una base de partida per a futurs estudis amb aquesta eina. Finalment s'utilitza aquesta eina per realitzar l'estudi de tres configuracions de climatització de l'interior de la BTS. El primer estudi consisteix en un escenari en que no hi ha cap element mecànic funcionant per a la refrigeració. El segon estudi és un escenari d'hivern en que es pot utilitzar la baixa entalpia de l'ambient per refrigerar l'aire a l'interior del BTS, sistema de refrigeració anomenat *free cooling*. En el tercer estudi de climatització es posa en marxa l'equip d'HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning).

Resumen

En el interior de un centro de procesamiento de datos (CPD) se encuentran diferentes equipos informáticos y de red que, como todo aparato electrónico en funcionamiento, incrementan de temperatura por el efecto Joule en las partes conductoras. Este incremento de temperatura en los equipos crea la necesidad de un sistema de refrigeración en el interior del CPD con el fin de garantizar un correcto funcionamiento de los equipos que lo integran. El objetivo de este trabajo será obtener la distribución de la temperatura del aire en el interior de un CPD para diferentes escenarios de climatización haciendo uso del software libre de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) OpenFOAM junto con la interfaz gráfica de usuario Helyx-OS. La tipología de CPD que se estudia en este trabajo es una BTS (*Base Transceiver Station*).

Primeramente se hace una introducción teórica de las ecuaciones que rigen la dinámica de fluidos y se sigue con la descripción de cómo afrontar los flujos turbulentos. También se realiza una introducción a la librería OpenFOAM con el fin de crear una base de partida para futuros estudios con esta herramienta. Finalmente se utiliza esta herramienta para realizar el estudio de tres configuraciones de climatización del interior de la BTS. El primer estudio consiste en un escenario en que no hay ningún elemento mecánico funcionando para la refrigeración. El segundo estudio es un escenario de invierno en que se puede utilizar la baja entalpía del ambiente para refrigerar el aire en el interior de la BTS, sistema de refrigeración llamado *free cooling*. En el tercer estudio de climatización se pone en marcha el equipo de HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*).

Abstract

In a data center (DC) there is different computer and network equipment that, like any electronic device in operation, increases in temperature by the Joule effect in the conductive parts. This increase in temperature creates the need for a cooling system inside the DC in order to guarantee the correct operation of the equipment. The objective of this project is to obtain the distribution of the air temperature inside a DC for different air conditioning scenarios using the free software of Computational Fluid Dynamics OpenFOAM along with the graphical user interface Helyx-OS. The type of DC studied in this project is a BTS (*Base Transceiver Station*).

This project begins with a theoretical introduction of the governing equations of fluid dynamics, followed by a description of how to deal with turbulent flows and an introduction to the basics of the OpenFOAM library, in order to create a starting point for future studies with this tool. Finally, this tool is used to carry out the study of three air conditioning configurations in a BTS. The first study consists of a scenario in which there is no mechanical element working for cooling. The second study is a winter scenario in which the low enthalpy of the environment can be used to cool the air inside the BTS, a cooling system called *free cooling*. The third configuration uses HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) equipment.

Agraïments

A la meva família, en especial a la meva mare Darifa per la seva inesgotable i saludable paciència.

Dono les gràcies al Joan Grau Barceló per la direcció d'aquest treball i els consells rebuts.



Glossari

BTS: De l'acrònim anglès *Base Transceiver Station*. És la denominació per a una estació base de transferència de dades mitjançant comunicació wireless entre diferents equips d'usuari. Aquest equips d'usuari poden ser telèfons mòbils, ràdios, ordinador amb connexió a internet sense fil, entre d'altres.

CFD: De l'acrònim anglès *Computational Fluid Dynamics*. És una branca de la mecànica de fluids i la transferència de calor que utilitza algorismes i mètodes numèrics per a la resolució de problemes.

Free Cooling: És un mètode econòmic de refrigeració on s'utilitza com a font freda l'aire ambient quan aquest té una entalpia inferior a la del fluid que es vol refrigerar.

HVAC: De l'acrònim anglès *Heating, Ventilating and Air Conditioning* (calefacció, ventilació i aire condicionat), que engloba el conjunt de mètodes i tècniques que estudien i analitzen el tractament de l'aire en quant al seu refredament, escalfament, (des) humidificació, qualitat, moviment, etc.

Rack: És un suport metàl·lic que s'utilitza per allotjar equipament normalment informàtic i de xarxa. Les mides dels racks estan estandarditzades perquè qualsevol equipament independentment del fabricant hi sigui compatible.

SAI: De l'acrònim *Sistema d'Alimentació Interrompuda*. Són dispositius utilitzats per garantir el subministrament elèctric durant un temps limitat de temps en cas d'una apagada elèctrica. Estan formats per bateries o altres sistemes d'emmagatzemat elèctric.



Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
GLOSSARI	VI
1. PREFACI	1
1.2. Origen del treball	1
1.3. Motivació	1
1.4. Requeriments previs.....	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius del treball.....	3
2.2. Abast del treball.....	3
3. CAMP TEÒRIC	4
3.1. Equacions fonamentals de la dinàmica de fluids	4
3.1.1. Conservació de la massa. Equació de continuïtat	5
3.1.2. Conservació de la quantitat de moviment. Navier-Stokes.....	5
3.1.3. Conservació de l'energia. Equació de l'energia	6
3.1.4. Comentari sobre les equacions fonamentals de la dinàmica de fluids.....	6
3.1.5. Derivada material o substancial	7
3.1.6. Divergència de la velocitat $\nabla \cdot \mathbf{c}$	7
3.2. Flux turbulent.....	8
3.2.1. Número de Reynolds – Règim laminar o turbulent.....	8
3.2.2. Règim turbulent	8
3.2.3. Mètodes per resoldre fluxos turbulents.....	10
3.2.4. Modelització de les zones properes a les parets.....	13
4. DINÀMICA DE FLUIDS COMPUTACIONAL	16
4.1. Introducció	16
4.2. OpenFOAM	17
4.2.1. Introducció	17
4.2.2. Estructura	18

4.2.3.	Generació de malles	19
4.2.4.	Condicions de contorn estàndard	32
4.2.5.	Execució de les aplicacions	35
4.3.	OpenFOAM utilitzant Helyx-OS com a interfície gràfica d'usuari	37
4.3.1.	Helyx-OS	37
4.3.2.	Estructura de la interfície	38
4.3.3.	Mallat amb Helyx-OS - snappyHexMesh	40
5.	ESTUDI AMB CFD D'UN CENTRE DE PROCESSAMENT DE DADES (CPD) _____	48
5.1.	Identificació del problema	48
5.1.1.	Descripció de la problemàtica a resoldre	48
5.1.2.	Escenaris a analitzar	51
5.1.3.	Hipòtesis	52
5.1.4.	Càlculs previs a la simulació	54
5.1.5.	Mallat	63
5.1.6.	Condicions de contorn	65
5.1.7.	Solver a utilitzar	68
5.2.	Escenari 1. Sense ventilació forçada	69
5.2.1.	Resum del temps de simulació	69
5.2.2.	Distribució de temperatures	71
5.3.	Escenari 2. Amb ventilació forçada mitjançant <i>free cooling</i>	73
5.3.1.	Resum del temps de simulació	73
5.3.2.	Distribució de temperatures	75
5.4.	Escenari 3. Amb ventilació forçada mitjançant l'equip d'HVAC	77
5.4.1.	Resum del temps de simulació	77
5.4.2.	Distribució de temperatures	77
6.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL _____	81
	CONCLUSIONS _____	82
	ANÀLISI ECONÒMICA _____	85
	BIBLIOGRAFIA _____	87
	ANNEX A _____	89
A1.	Malles dels tres escenaris estudiats	89

1. Prefaci

1.2. Origen del treball

A l'interior d'una estació base de transferència de dades mitjançant comunicació wireless (Base Transceiver Station, BTS) es troben equips informàtics i de comunicacions encarregats de processar les dades transferides entre diferents usuaris. També es troben altres equips utilitzats per garantir el correcte funcionament, com són les bateries i els rectificadors. Els equips que processen les dades, els quals es troben dintre dels armaris (Racks), són els majors responsables de l'increment de la temperatura a l'interior de la BTS. Aquests equips són refrigerats amb l'aire de l'estança i l'aire calent residual del procés de refrigeració és alliberat de nou a l'estança fent-ne incrementar la temperatura.

La temperatura a l'interior de la BTS incideix en el funcionament i la vida útil dels diferents equips que la integren. Un exemple són les bateries que actuen com a SAI (*Sistema d'Alimentació Interrompuda*) les quals tenen una vida útil condicionada per la temperatura a la que es troben al llarg de la seva vida.

L'origen d'aquest treball és la necessitat d'analitzar la incidència de la temperatura en el funcionament i la vida útil dels diferents equips que integren una BTS (cas particular de centre de processament de dades, CPD) per a diferents configuracions de climatització.

1.3. Motivació

La CFD (*Computational Fluid Dynamics*) és una eina molt utilitzada en el sector industrial i d'investigació, juntament amb l'experimentació, per l'estudi de diferents fenòmens i problemàtiques relacionades amb la mecànica de fluids i la transferència de calor. La importància per a tot enginyer de tenir coneixement d'aquesta eina i el potencial d'aquesta, han despertat el meu interès per familiaritzar-me en el seu ús. En aquest treball tindrè l'oportunitat d'aprendre a utilitzar programari lliure de CFD per resoldre una problemàtica real.

1.4. Requeriments previs

Per afrontar la modelització del problema a resoldre s'haurà d'interpretar la física que l'envolta i per tant seran necessaris coneixements previs de mecànica de fluids, termodinàmica i transferència de calor. S'ha de ser capaç de poder descriure la tipologia del flux, com es transfereix la calor, quines

hipòtesis es poden realitzar i quines no, decidir quin model de turbulència és més apte per l'estudi, entre d'altres consideracions.

2. Introducció

2.1. Objectius del treball

L'objectiu d'aquest treball és la utilització de programari lliure de Dinàmica de Fluids Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) amb la finalitat d'avaluar el comportament tèrmic i dinàmic de l'aire a l'interior d'un centre de processament de dades CPD, en concret una BTS.

Es decideix treballar amb la llibreria OpenFOAM per a simulacions de CFD fent ús de la interfície gràfica d'usuari Helyx-OS per a Linux. Per tant, un altre objectiu d'aquest treball serà aprendre a utilitzar la llibreria OpenFOAM i la interfície gràfica d' Helyx-OS des de zero. Es plasmaran tots els coneixements adquirits al respecte per que siguin utilitzats d'ajuda per altres persones que vulguin utilitzar aquest eines per a la resolució de problemes de CFD.

Es modelitzarà el clima a l'interior de les BTS en tres escenaris diferents, representat tres configuracions de climatització:

- Cap element mecànic està funcionant per refrigerar l'interior de l'estança.
- *Free Cooling*. Es considera una situació d'hivern en que es pot aprofitar la baixa entalpia de l'ambient per refrigerar l'aire de l'interior de l'estança.
- Es considera una situació d'estiu on es posa l'equip d'HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) en funcionament per a refrigerar l'interior de la BTS.

2.2. Abast del treball

L'origen d'aquest treball és la necessitat d'analitzar la incidència de la temperatura en el funcionament i la vida útil dels diferents components que integren una BTS. L'abast d'aquest treball és donar suport a aquest anàlisis subministrant les dades obtingudes a partir de la simulació en CFD del clima a l'interior de la BTS. Per tant, aquest treball no té com a objectiu estudiar la incidència sobre els equips, sinó l'obtenció de les dades que seran utilitzades posteriorment per aquest estudi d'incidència.

3. Camp teòric

3.1. Equacions fonamentals de la dinàmica de fluids

Les equacions que governen la dinàmica de fluids estan basades en tres principis fonamentals de la física:

1. Conservació de la massa.
2. Conservació de la quantitat de moviment. La variació de la quantitat de moviment, o moment, és igual a la suma de forces externes actuant sobre el fluid (segona llei de Newton)
3. Conservació de l'energia. La variació d'energia en un sistema tancat és igual a l'intercanvi de calor i treball entre l'entorn i el sistema (primera llei de la Termodinàmica)

Els tres principis anterior són aplicats sobre una fracció del fluid (model utilitzat per discretitzar el fluid) amb la finalitat de poder extreure equacions que descriguin la variació en espai i temps de les propietats del fluid.

Pel desenvolupament de les equacions es considera el fluid com un medi continu. S'estudia el fluid macroscòpicament com un conjunt infinit de partícules, es a dir, sense considerar les discontinuïtats existents a nivell microscòpic (a nivell atòmic o molecular). Les propietats del fluid es poden descriure mitjançant funcions contínues sota aquestes condicions.

La fracció de fluid per desenvolupar les equacions és la més petita possible en que es pot considerar que les propietats macroscòpiques (per exemple velocitat, pressió, densitat y temperatura) no es veuen afectades per les propietats de cada molècula individual de fluid.

Depenent del model utilitzat per discretitzar el fluid les equacions poden ser obtingudes en forma conservativa o no conservativa, i al mateix temps, poden ser expressades en forma integral o diferencial. Si s'apliquen els tres principis descrits anteriorment sobre un volum de control finit s'obtenen les equacions en forma integral. Si aquest volum de control finit es mou amb el fluid les equacions obtingudes estaran en forma no conservativa, si es troba quiet en l'espai, s'obtenen en forma conservativa. Si s'apliquen els tres principis sobre un volum de control infinitesimal (no finit) s'obtenen les equacions en forma diferencial. Igual que en el cas anterior, si el volum de control infinitesimal es mou amb el fluid seran en forma no conservativa i si esta quiet en l'espai seran en forma conservativa.

3.1.1. Conservació de la massa. Equació de continuïtat

Per a un volum de control infinitesimal en coordenades cartesianes, travessat per un flux transitori i compressible (o incompressible) es pot definir l'equació de continuïtat en forma diferencial i conservativa en coordenades com:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{c}) = 0 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

On ρ és la densitat del fluid. Com es pot deduir, l'equació de continuïtat és una equació escalar.

3.1.2. Conservació de la quantitat de moviment. Navier-Stokes

Per a un volum de control infinitesimal en coordenades cartesianes, suposant un fluid newtonià i un flux transitori, compressible (o incompressible) i laminar, es pot definir l'equació de Navier-Stokes en forma diferencial i conservativa com:

Coordenada x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda (\vec{\nabla} \cdot \vec{c}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho g_x \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Coordenada y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda (\vec{\nabla} \cdot \vec{c}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho g_y \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Coordenada z:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda (\vec{\nabla} \cdot \vec{c}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

On λ és el coeficient volumètric de viscositat de valor $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$. Com es pot deduir, l'equació de continuïtat és una equació vectorial.

3.1.3. Conservació de l'energia. Equació de l'energia

Per a un volum de control infinitesimal en coordenades cartesianes, suposant un flux transitori i compressible (o incompressible), es pot definir l'equació de l'energia en forma diferencial, i conservativa com:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla(\rho e \vec{c}) = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \\ + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

On e és l'energia interna per unitat de massa ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), \dot{q} és la generació de calor a l'interior del volum de control infinitesimal (per exemple deguda a la absorció o emissió de radiació). Com es pot deduir, l'equació de l'energia és una equació escalar.

3.1.4. Comentari sobre les equacions fonamentals de la dinàmica de fluids

A priori el sistema no és resoluble ja que conté 5 equacions amb 6 incògnites ρ, p, u, v, w, e (6 variables d'estat). Per resoldre-ho s'introdueix una equació d'estat. Per exemple, en el cas objecte d'aquest treball, es pot utilitzar com equació d'estat la dels gasos ideals ja que sota les condicions de treball l'aire es comporta com un gas ideal. Per un gas ideal es té la següent relació:

$$p = \rho R' T \quad (\text{Eq. 3.6})$$

On R' és la constant específica dels gasos, que per l'aire és $286.69 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

En aquest punt es tenen 6 equacions i 7 incògnites (s'ha afegit la variable T). La setena equació s'obté de la relació termodinàmica entre variables d'estat. Per exemple, per la energia interna es té $e = e(T, p)$ i per l'entalpia $h = h(T, p)$. Per un gas ideal amb calor específic constant, la relació $e = e(T, p)$ és:

$$e = c_v T \quad (\text{Eq. 3.7})$$

c_v és el calor específic de l'aire a volum constant.

Afegint les equacions Eq. 3.6 i Eq. 3.7 es té un sistema de 7 equacions i 7 incògnites ρ, p, u, v, w, e i T .

Les equacions definides anteriorment formen un sistema acoblat d'equacions diferencials parcials no lineal complex de resoldre de forma analítica. A dia d'avui (8) no es coneix una solució tancada per aquestes equacions i això obre les portes a l'ús dels mètodes numèrics per trobar solucions aproximades.

3.1.5. Derivada material o substancial

La derivada material defineix la variació de qualsevol propietat del fluid al llarg de la seva trajectòria. L'observador es mou amb la partícula i nota els canvis en les propietats d'aquesta deguts a:

- El canvi de la propietat en un punt fix del camp de fluid al llarg del temps. Amb el pas del temps el valor d'una propietat en un punt fix del camp de fluid pot variar per les diferents fluctuacions a les que pot estar sotmès. A aquest tipus de canvi se l'anomena Derivada Local.
- El canvi de la propietat al moure's des d'un punt del camp de fluid a un altre amb propietats diferents. A aquest tipus de canvi se l'anomena Derivada Convectiva.

Matemàticament es pot definir la derivada material per a la funció f (per exemple, una propietat del fluid) com:

$$\frac{D(f)}{Dt} \equiv \underbrace{\frac{\partial(f)}{\partial t}}_{\text{Derivada Local}} + \underbrace{(\vec{c} \cdot \nabla) \cdot (f)}_{\text{Derivada Convectiva}} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Per exemple, la derivada material per a la temperatura al passar del punt (x_1, y_1, z_1, t_1) al punt (x_2, y_2, z_2, t_2) és:

$$\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \right) = \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{c} \cdot \nabla) \cdot T = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_1 + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 + \left(v \frac{\partial T}{\partial y} \right)_1 + \left(w \frac{\partial T}{\partial z} \right)_1$$

3.1.6. Divergència de la velocitat $\nabla \cdot \vec{c}$

El terme $\nabla \cdot \vec{c}$ apareix freqüentment en les equacions de la mecànica de fluids. Físicament es defineix com la variació temporal del volum d'un fluid en moviment, per unitat de volum.

$$\nabla \cdot \vec{c} = \frac{1}{\delta V} \frac{D(\delta V)}{Dt} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

On δV és un volum de control infinitesimal que inclou sempre la mateixa massa al moure's per l'espai. El volum de control pot canviar degut als canvis de densitat des d'un punt espacial a un altre.

Per a més detalls de les equacions anteriors es pot veure el capítol 2 de la referència 8.

3.2. Flux turbulent

3.2.1. Número de Reynolds – Règim laminar o turbulent

El numero de Reynolds és un numero adimensional que s'utilitza per caracteritzar el moviment d'un fluid. Aquest número adimensional relaciona les forces que condueixen un fluid; forces inercials i viscoses. Es defineix com:

$$Re = \frac{\rho U_{ref} L_{car}}{\mu} = \frac{U_{ref} L_{car}}{\nu} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$Re = \frac{\text{força inercial}}{\text{força viscosa}}$$

On U_{ref} és una velocitat característica del fluid, L_{car} una longitud característica, μ la viscositat dinàmica en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ i ν la viscositat cinemàtica en $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

Tots els fluxos esdevenen inestables per sobre d'un numero de Reynolds. A baixos números de Reynolds els fluxos són laminars (dominats per la viscositat del fluid) mentre que a alts números són turbulents (dominats per la inèrcia del fluid).

En regim laminar el moviment del fluid és ordenat, suau i es mou en lamines paral·leles sense entrecreuar-se i cada partícula de fluid segueix una trajectòria suau anomenada línia de corrent. El fluxos laminars estan definits completament per les equacions descrites en l'aparta 3.1 d'aquest treball. En contra, en fluxos en règim turbulent el moviment del fluid és caòtic i aleatori, on les propietats del fluid (velocitat, pressió, etc) varien contínuament en un punt fix del flux.

3.2.2. Règim turbulent

La turbulència pot ser entesa com una seria de remolins (eddies) tridimensionals de diferent mida que interaccionen entre ells constantment en un règim intrínsecament transitori. No hi ha una definició exacte del comportament d'aquests remolins, però es caracteritzen per una velocitat i longitud (diàmetre del remoli) característica. Els remolins més grans tenen una velocitat i longitud característica de l'ordre de la velocitat i longitud característica del domini. Per un altre banda, els remolins més petits són d'un ordre de longitud característica molt més petit i tenen una velocitat característica més gran. El mecanisme de formació i progrés d'aquest remolins s'anomena *Energy Cascade*; els remolins més grans es formen quan una línia de corrent es desprèn de la seva trajectòria degut a la inestabilitat del flux (el flux a altes velocitats adquireix vorticitat en les zones properes a les parets per la condició de no lliscament de les parets). Aquests remolins més grans extreuen energia cinètica del flux principal al interactuar amb ell i pel procés del Vortex Stretching el diàmetre del

remoli cada cop es fa més petit i gira a més velocitat al conservar-se el moment angular (Moment = [Massa Partícula] · [Radi de Rotació] · [Velocitat Tangencial]). Finalment els remolins més petits dissipen l'energia cinètica obtinguda dels remolins més grans en forma de calor a través de la fricció entre les partícules de fluid.

Encara que el flux principal estigui en règim estacionari, quan es tracta d'un flux turbulent el règim és transitori. Els remolins, els quals estan intrínsecament en un règim transitori, creen fluctuacions en el valor de la velocitat, pressió, temperatura o densitat en un punt fix de l'espai. En la Figura 3.1 es mostra la fluctuació de la velocitat en un punt fix del flux degut a la turbulència.

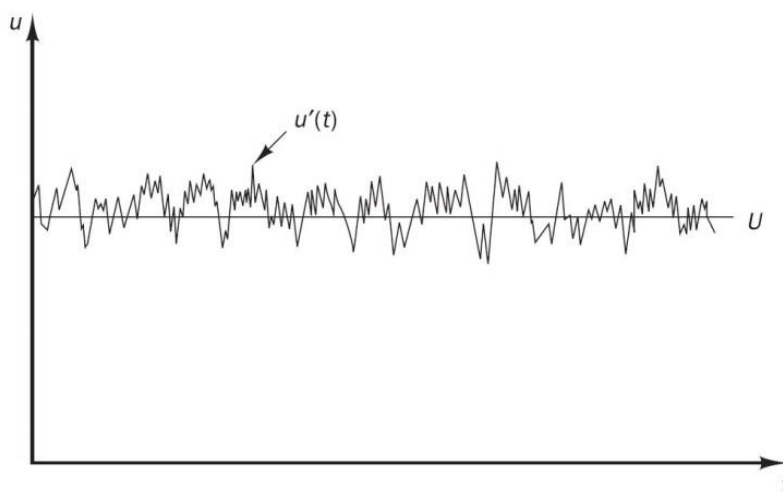


Figura 3.1. Velocitat en un punt fix del flux. (Font: Referència 7, *Figure 3.1. Typical point velocity measurement in turbulent flow*)

La figura anterior suggereix que les propietats físiques del fluid es poden descompondre en la suma del valor mig de la propietat (al llarg d'un increment de temps) més una component fluctuant. Aquesta definició de la variable s'anomena Descomposició de Reynolds.

Per un règim estacionari i/o transitori, el valor mig de la component x de la velocitat, \bar{u} , es defineix com:

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u(t) dt \quad (\text{Eq. 3.11})$$

On Δt és un interval en el qual la velocitat pot variar (règim transitori) o mantenir-se constant (règim estacionari). La velocitat queda de la següent forma:

$$u = \bar{u} + u' \quad (\text{Eq. 3.12})$$

On u' és la component fluctuant. Per definició es té que el valor mig d'una variable fluctuant és 0, $\overline{u'} = 0$. Per les altres propietats es tindria el mateix; $p = \bar{p} + p'$, $T = \bar{T} + T'$, etc.

Per un altre banda, experimentalment es demostra que degut a les fluctuacions l'esforç tallant en un flux turbulent és superior al d'un flux laminar. L'esforç tallant en un flux turbulent està format per una component laminar que fa referència a la fricció entre les capes de fluid en la direcció del flux i un altre component turbulent (anomenat esforç de Reynolds o esforç Turbulent) que fa referència a la fricció entre les partícules de fluid al fluctuar. En un flux laminar, al no haver fluctuacions, l'esforç tallant queda totalment definit amb la component laminar. L'esforç tallant de Reynolds τ_{yx} mitjanat, és:

$$\tau_{yx} = \underbrace{\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}}_{\text{laminar}} - \underbrace{\rho \overline{u'v'}}_{\text{turbulent}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

On $\overline{u'v'}$ és el producte de les components fluctuant de la velocitat en la direcció y i x, respectivament, mitjanat al llarg del temps. ρ és la densitat del fluid, considerada no fluctuant i μ la viscositat dinàmica. L'esforç de Reynolds complet, és un tensor simètric de 9 components (6 esforços tallants i 3 esforços normals) difícil de quantificar, que afegeix 6 incògnites.. Actualment es considera un dels majors problemes a resoldre per la mecànica de fluids. S'han elaborat diferents formulacions semi empíriques que modelen l'esforç de Reynolds en termes de gradients de velocitat mitjanes. Un exemple simple és la hipòtesi proposada per Joseph Boussinesq (1842-1929) introduint la viscositat turbulenta μ_t considerada isentròpica:

$$-\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

μ_t és una nova variable que ha de ser quantificada. Els **models de turbulència RANS** (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, descrit en l'apartat següent) quantifiquen aquesta nova variable. La descomposició en termes mitjos i fluctuants i el seu posterior mitjanat descrits anteriorment és una metodologia utilitzada només pel mètode RANS.

3.2.3. Mètodes per resoldre fluxos turbulents

La necessitat de desenvolupar mètodes per fer una predicció dels efectes turbulents sorgeix del fet que la majoria de fluxos en problemes d'interès en la mecànica de fluids tenen un comportament turbulent. Per descriure la turbulència de forma directa en CFD amb les equacions de la mecànica de fluids aplicades sobre cada un dels remolins, es necessiten malles molt refinades i passos de temps de càlcul molt petits per captar tota la física involucrada. En la actualitat no es poden resoldre problemes d'interès industrial d'aquesta forma ja que la demanda computacional és excessiva i s'opta per mètodes aproximats. Hi ha tres grans mètodes segons el grau de demanda computacional.

1. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

Aquest mètode està enfocat a resoldre el flux principal i modelitza l'efecte de la turbulència en les propietats del fluid sense la necessitat de resoldre cada un dels remolins. Al procés de modelització fa que la demanda computacional no sigui molt elevada i és per això que és el mètode més utilitzat en l'actualitat. En aquest mètode es descomponen les variables del fluid en la suma d'una component mitjana i una component fluctuant (veure apartat 3.2.2). S'introdueixen aquestes variables en les equacions que governen la mecànica de fluids i posteriorment les equacions són amitjanades al llarg del temps obtenint les equacions RANS. A continuació es mostra aquest procés per a l'equació de continuïtat per un fluid incompressible:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} &= \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} = \frac{\partial(\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w})}{\partial z} = 0\end{aligned}$$

On la mitjana d'una mitja és la mitja ($\bar{\bar{u}} = \bar{u}$), la mitjana d'un valor fluctuant és 0 ($\bar{u'} = 0$) i on la mitja de una suma és la suma de mitges ($\overline{\bar{u} + u'} = \bar{\bar{u}} + \bar{u'}$).

Tal com s'ha comentat en l'apartat anterior, el tensor esforç de Reynolds afegeix 6 incògnites que són resoltes de forma aproximada utilitzant models de turbulència. No existeix un model de turbulència universal, hi ha diferents models i cada un d'ells és acceptable depenent de les condicions del problema a resoldre i la capacitat computacional de la qual es disposa. Els 5 models RANS més comuns es poden classificar en base al nombre d'equacions de transport que afegeixen per resoldre el tensor esforç de Reynolds:

Prandtl's Mixing Length Model: És un model simple de baixa demanda computacional i que no aporta cap equació addicional per a la resolució del tensor esforç de Reynolds. És una expressió algebraica que relaciona la viscositat turbulenta μ_t amb els gradients de velocitat. Per la component τ_{yx} del tensor esforç tallant de Reynolds es tindria el següent:

$$\tau_{yx} = \underbrace{\mu \frac{\partial \bar{u'}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'}}_{\substack{\text{Hipòtesi} \\ \text{Boussinesq}}} = \mu \frac{\partial \bar{u'}}{\partial y} + \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \mu \frac{\partial \bar{u'}}{\partial y} + \rho l_{min}^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{Eq. 3.15})$$

l_m és la longitud de mescla (mixing length) relacionada amb la mida mitjana dels remolins. És una variable que adopta diferents valors en diferents punt del flux. Aquest model es tanca

matemàticament expressant la longitud de mescla en funció de longituds característiques del flux (per a geometries de flux complexes és difícil).

Spalart-Allmaras Model: És un model relativament nou (1992) que no està molt ben calibrat per a fins industrials generals, ja que ha estat dissenyat específicament per aplicacions aeroespacials que involucren fluxos sobre parets. També s'ha demostrat que dona bons resultats per a capes límits subjectes a gradients de pressió adversa. Aporta una sola equació de transport per a la viscositat turbulenta μ_t . El fet de afegir una sola equació fa que sigui un dels models de menys demanda computacional. Es fa la hipòtesi de que la viscositat turbulenta μ_t és isentròpica. No és recomanable en fluxos on hi ha canvis bruscos de geometria, en zones on es poden formar separacions en el flux o en regions del flux on es passa de flux sobre paret a flux lliure.

k- ϵ Model: És el model més utilitzat degut a la seva robustesa, baixa demanda computacional i raonable precisió en un gran ventall de problemes d'enginyeria. Va ser proposat per Launder i Spalding (Standard k- ϵ , 1974) i fins a l'actualitat s'ha testejat i millorat contínuament fent possible l'aparició de nous models derivats del **Standard k- ϵ** com són el **Realizable k- ϵ** i el **RNG k- ϵ** , sent el **Realizable k- ϵ** el que dona millors resultats per fluxos rotatoris, amb forts gradients adversos de pressió, desprendiments de capa límit i separacions. Aquests models aporten 2 equacions de transport, una per la l'energia cinètica turbulenta k i un altre per la dissipació d'energia cinètica turbulenta ϵ . Es calcula k i ϵ a partir d'aquestes equacions i s'obté la viscositat turbulenta μ_t , considerada isentròpica, a partir de la següent relació:

$$u_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

C_μ és una constant de valor 0.09.

k- ω Model: El model **Standard k- ω** està basat en el model **Wilcox k- ω** (1988) que fa una bona predicció en desprendiment de capes límit, esteles, i en regions del flux on es passa de flux sobre paret a flux lliure. Un model millorat que deriva del **Standard k- ω** és el **Shear-Stress Transport (SST) k- ω** . Aquests models aporten 2 equacions de transport, una per la l'energia cinètica turbulenta k i un altre per la dissipació d'energia cinètica turbulenta específica ω . Es calcula k i ω a partir d'aquestes equacions i s'obté la viscositat turbulenta μ_t , considerada isentròpica, a partir de la següent relació:

$$u_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Reynolds Stress Model (RSM): És el model de turbulència més elaborat de tots. Aporta 7 equacions de transport, una per cada un dels 6 components del tensor d'esforç de Reynolds, més una equació per la dissipació d'energia cinètica turbulenta ϵ . El fet de ser un model relativament nou i la alta

demanda computacional per la aportació de 7 noves equacions, fa que no estigui testejat per un gran ventall de problemes d'enginyeria. Resol de forma més precisa fluxos complexos amb curvatures, rotacions, amb remolins i canvis bruscos (un exemple serien ciclons o fluxos en processos de combustió). En aquest model no es fa la hipòtesi de Joseph Boussinesq de que la viscositat turbulenta μ_t és isentròpica.

Una simplificació d'aquest model és l'**Algebraic Stress Model (ASM)** en el qual és negligeixen els termes convectius i difusius de les 7 equacions, quedant un model simplificat que només aporta 4 equacions algebraiques addicionals.

2. Large Eddy Simulation (LES):

Aquesta tècnica calcula de forma directa els remolins d'escala superior mentre que els remolins de petita escala són modelitzats. La suposició que es fa en la modelització és que els remolins més petits són isotròpics, es a dir, el seu comportament és independent del sistema de coordenades i estadísticament similar i predictable. Tot i que aquest mètode està inclòs en molts paquets de CFD, requereix una demanda computacional important degut a la necessitat d'una malla molt més refinada de la que es necessita en el mètode RANS.

3. Direct Numerical Simulation (DNS):

És el mètode de més demanda computacional. Aquest mètode aplica les equacions de la mecànica de fluids de forma directa sobre cada un dels remolins calculant les components fluctuants. Es necessiten malles tridimensionals molt fines i passos de temps molt petits per captar totes les fluctuacions de les variables d'interès. Té poques aplicacions practiques ja que per la resolució d'un problema d'enginyeria en un temps raonable es necessiten supercomputadores que a dia d'avui no existeixen (14).

3.2.4. Modelització de les zones properes a les parets

Les zones properes a les parets són la font principal de vòrtexs i turbulència, de fet, es en aquestes zones on les variables d'interès pateixen un major gradient i el transport de massa, moment i energia és més vigorós (3). Si aquesta zona no es resol correctament, afecte negativament a la resta del flux fent que els resultats dels càlculs realitzats no siguin fiables. Per aquest motiu la mida de les cel·les properes a les parets afecten significativament a la fiabilitat dels resultats i per tant s'ha d'assegurar un mida de cel·la suficientment petit a les zones properes a les parets per que es puguin captar tots els fenòmens que succeeixen a petita escala. Per determinar la mida de cel·la necessària a la zona propera a la paret s'utilitza el paràmetre y^+ . Aquest paràmetre adimensional és utilitzat, com a coordenada en la direcció normal a la paret, per mesurar el gruix de capa de fluid des de la paret.

Nombrosos experiments demostren que la zona propera a la paret pot ser subdividida en tres grans capes (3) segons la tipologia de flux. La capa més propera a la paret ($y^+ < 5$) s'anomena capa viscosa (viscous sublayer), on el flux és laminar degut a la forta influència de la viscositat i la condició de no lliscament de la paret la qual frena el fluid. En la zona més allunyada de la paret ($1000 > y^+ > 30$) es té la capa d'encavalcament (overlap layer o inertial sublayer), on el flux no es troba molt afectat per la paret i per tant la inèrcia juga un paper més important que la viscositat. Entre aquestes dos capes ($5 < y^+ < 30$) es té una capa que tant la viscositat com la inèrcia tenen un paper important (buffer layer). Per a $y^+ > 1000$ es troba el flux turbulent totalment desenvolupat on els gradients són baixos i el transport de massa, moment i energia és més suau. Per la capa viscosa i la capa d'encavalcament els perfils de la velocitat estan definits a partir d'expressions empíriques.

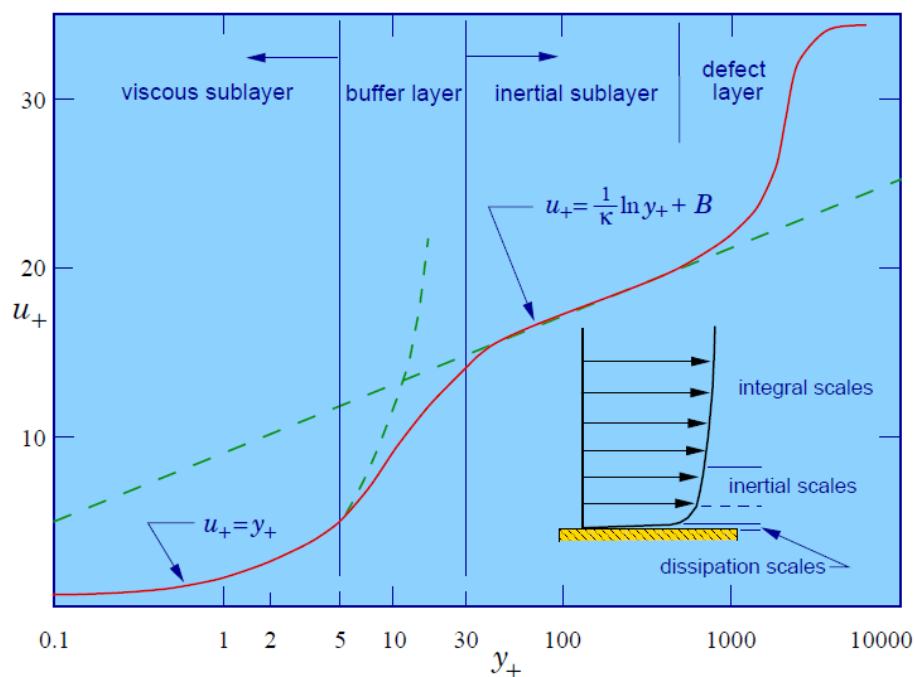


Figura 3.2. Velocitat normalitzada u^+ en funció de y^+ . (Font: LearnCAX)

Hi ha dos mètodes per resoldre les zones properes a la paret; fent ús de les funcions de paret (Wall functions) o resolent directament. Les funcions de paret utilitzen equacions semi empíriques per modelar tota la capa viscosa, evitant així la necessitat de generar malles amb cel·les de mida molt petita en les regions properes a la paret per poder captar el que passa en aquesta regió. En la resolució directa, en canvi, s'ha d'assegurar una mida de cel·la suficientment petita (s'ha de tenir almenys una cel·la dintre de la capa viscosa, $y^+ < 5$) ja que la capa viscosa es resol de la mateixa manera que la resta del flux.

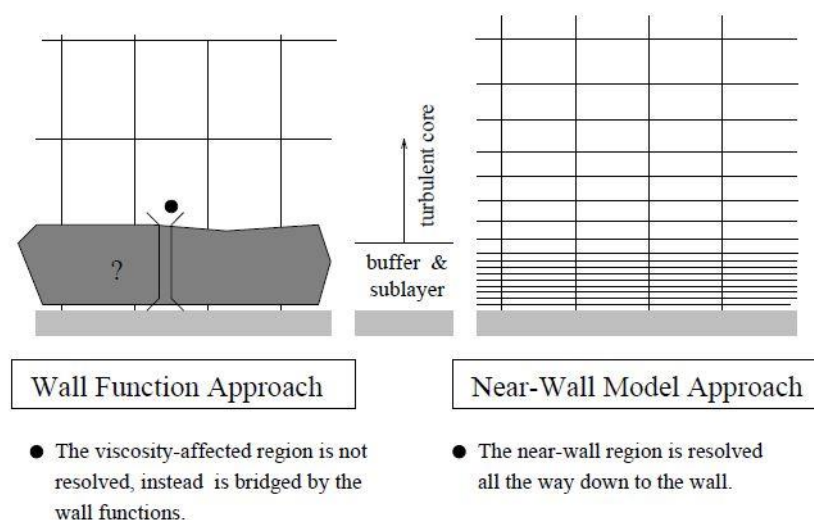


Figura 3.3. Diferència entre Wall Function o resolució directa (Near-Wall Model Approach, segons FLUENT). (Font: referència 3)

Els models de turbulència Spalart Allmaras i $k-\omega$ han set dissenyats per resoldre de forma fiable la capa viscosa, mentre que els altres models comentats en aquest treball utilitzen funcions de paret. Per tant, si es volgués una definició molt precisa de la capa viscosa s'utilitzarien els dos primers, mentre que si només es vol captar l'efecte d'aquesta capa viscosa sobre el flux global, millor utilitzar els últims juntament amb les funcions de paret.

S'ha d'evitar que la primera cel·la adjacent a la paret quedi dintre de la buffer layer ($5 < y^+ < 30$) ja que ni les funcions de paret ni els models de turbulència en fan una resolució correcte. En el cas de només estar interessats en els efectes de la capa viscosa sobre el flux global, es recomana l'ús de funcions de paret i una mida de la primera cel·la adjacent a la paret que quedi dintre de una capa de gruix $y^+ > 30$.

OpenFOAM, sigui quin sigui el model de turbulència escollit, utilitza funcions de paret sempre que la primera cel·la adjacent a la paret es trobi fora de la capa de gruix $y^+ = 11.225$. Si la cel·la es troba dintre de la capa de gruix $y^+ < 5$ s'ha d'utilitzar un dels models de turbulència capaç de captar els fenòmens d'aquesta capa.

4. Dinàmica de fluids computacional

4.1. Introducció

La dinàmica de fluids computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) és la branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics per l'estudi de problemes de fluxos de fluids i transferència de calor mitjançant l'ús de computadores. L'estudi dels fluxos de fluids i transferència de calor fins a finals del segle XX es realitzava mitjançant la teoria i l'experimentació, va ser amb l'aparició de les computadores que es va desenvolupar aquesta nova branca per realitzar estudis. El mètode consisteix en discretitzar el domini del flux en petits volums de control. Fet això, es procedeix a la caracterització del problema a resoldre definint condicions de contorn, la tipologia del flux i les propietats del fluid. Finalment mitjançant mètodes numèrics es resolen de forma iterativa les equacions diferencials que governen la dinàmica de fluids en cada un dels volums de control fins que el residu és suficientment petit.

La CFD i l'experimentació són tècniques que es complementen entre si, moltes simulacions són validades a partir de dades experimentals i molts experiments són complementats amb les dades obtingudes mitjançant CFD. Per exemple (14), mitjançant experimentació es podrien obtenir propietats globals del flux, com són sustentació, força d'arrossegament, caiguda de pressió, mentre que s'utilitzaria la CFD per obtenir detalls del camp de flux com són esforços de tall, perfils de velocitat i pressió, etc.

Alguns dels avantatges de la CFD són:

- La reducció de costos d'experimentació mitjançant la optimització d'aquests.
- L'accessibilitat a condicions de treball no accessibles en la realitat
- L'obtenció d'un gran nombre de dades i la relativa flexibilitat per crear configuracions diferents d'un mateix estudi.

Actualment la CFD pot resoldre fluxos laminars amb facilitat donant resultats precisos, però quan es tracte de fluxos turbulents d'interès pràctic no poden ser resolts sense fer ús dels models de turbulència. Els resultats d'un estudi en CFD d'un flux turbulent seran tan bons com bo és el model de turbulència aplicat (14). Cal destacar que la majoria de models de turbulència utilitzats a l'actualitat donen resultats suficientment bons per un gran ventall de problemes d'enginyeria.

4.2. OpenFOAM

4.2.1. Introducció

Open source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM) és una llibreria C++ de codi lliure, publicada sota la llicència GNU (General Public License) pel desenvolupament de solucions numèriques i pre-/post-processat de problemes de la mecànica de medis continus, especialment la dinàmica de fluids computacional (CFD). Apart de la llibreria, OpenFOAM incorpora solvers i aplicacions estàndards que treballen amb la llibreria per a la resolució d'un gran nombre de problemes de CFD. Un dels punts forts de OpenFOAM és que esta construïda amb la finalitat de facilitar a l'usuari la creació de solvers i aplicacions personalitzades.

Aquesta llibreria permet:

- La creació, importació i manipulació (refinament, creació de regions, etc) de malles.
- La preparació de la simulació: Definició de les condicions de contorn, naturalesa del problema a resoldre i els mètodes numèrics a utilitzar.
- La visualització de resultats amb la interfície d'usuari lliure ParaView.
- Càlculs en paral·lel: Permet la descomposició i el càlcul de models en més d'un core.

Tipologia de problemes que es poden afrontar amb OpenFOAM:

- Flux incompressible amb els models de turbulència RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) i LES (Large Eddy Simulation).
- Flux compressible amb els models de turbulència RANS i LES.
- Buoyancy – Ventilació natural.
- Flux multi fase.
- Combustió.
- Transferència de calor.
- Dinàmica molecular i reaccions químiques.
- Electromagnetisme.
- Dinàmica de sòlids.
- Particle-tracking: per l'estudi de la interacció d'una partícula en un camp (fluid o magnètic).
- DNS (Direct Numerical Simulation)
- DSMC (Direct Simulation Monte Carlo)

Un dels inconvenients de la llibreria OpenFoam és que no ve acompanyada d'una interfície gràfica d'usuari (GUI), han set altres companyies les que han desenvolupat GUI que treballen amb aquesta llibreria. Un exemple és Helyx-OS, la qual s'ha utilitzat en aquest treball.

4.2.2. Estructura

Tal com s'ha comentat abans no es disposa d'interfície gràfica d'usuari, la interacció de l'usuari amb la llibreria es realitza mitjançant arxius de text (majoritàriament diccionaris) on es descriu el model. OpenFOAM organitza el model (cas) a resoldre en directoris (carpetes). Es té un directori principal que porta el nom del cas i dintre d'aquest hi ha diferents subdirectoris amb arxius de text on es descriu el model (geometria, malla, propietats del fluid, condicions de contorn, mètodes numèrics utilitzats, etc).

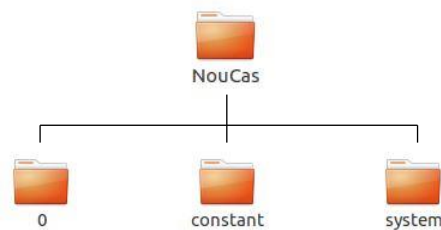


Figura 4.1. Directori NouCas i subdirectoris constant, system i time directorie 0.

Un cas esta normalment compostats de tres tipus de subdirectoris:

- **constant:** descripció de la malla (dintre del subdirectori polyMesh), de les geometries (dintre del subdirectori triSurface) i les propietats físiques (material, equacions d'estat, models termodinàmics, etc) del problema a resoldre.



- **system:** descripció dels paràmetres relacionats amb la resolució del problema. Conté com a mínim 3 arxius:
 - controlDict: on es defineixen els temps d'inicialització/finalització, el pas de temps (deltaT), freqüència en que es volen guardar els resultats, format dels resultats, etc. Aquest arxiu pot ser modificat durant l'execució ja que aquest arxiu es llegeix en cada pas de temps (l'opció runTimeModifiable d'aquest mateix arxiu ha d'estar a yes)
 - fvSchemes: on es defineixen els mètodes numèrics utilitzats per a la resolució del problema.
 - fvSolution: on es defineixen paràmetres que controlen els algoritmes utilitzats per a la resolució (toleràncies, numero mínim d'iteracions, entre d'altres)

Apart d'aquests 3 arxius se'n poden trobar d'altres depenent del problema a resoldre: blockMeshDict (diccionari on es descriuen els paràmetres relacionats amb la malla base, s'executa amb l'aplicació blockMesh), snappyHexMeshDict (diccionari on es descriuen els paràmetres relacionats amb la manipulació de la malla base, s'executa amb l'aplicació

snappyHexMesh), setFieldsDict (inicialització de les variables en un subdomini dintre del domini principal, s'executa amb l'aplicació setFields), entre d'altres.



- **time directories:** on es troben els diferents instants de temps del problema a resoldre. Aquestes carpetes porten el nom de l'instant de temps a que fan referencia i inclouen diferents arxius (U, p, T, epsilon, k, etc) que defineixen el valor de cada variable en aquest instant de temps i les condicions de contorn. Normalment els problemes s'inicialitzen en l'instant 0, per tant en la carpeta **0** es tenen els valors inicials de les variables establertes per l'usuari (valors inicials i condicions de contorn que han de ser introduïdes per l'usuari). OpenFOAM genera automàticament, durant l'execució del problema, carpetes amb el valor de les variables per cada instant de temps (per exemple, si en el controlDict s'ha definit guardar resultats cada 0.1s per una simulació de 0.5s, es generaran les carpetes 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 i 0.5 amb els respectius resultats).



Dintre del subdirectori tutorials/ en el directori on es té instal·lat OpenFOAM es tenen diferents casos estàndard segons la tipologies de problema (combustion, heatTransfer, compressible, incompressible, multiphase, entre d'altres). Aquests casos han set creats amb la finalitat de ser utilitzats com a punt de partida per a l'usuari a la hora de començar un nou cas. Des de OpenFOAM es recomana, si es vol fer un nou cas, fer una copia del cas que es troba dintre d'aquest directori que millor respongui a la tipologia del nou cas que es vol crear i modificar els diferents arxius d'aquesta copia per adaptar-la al nou cas que es vol resoldre.

4.2.3. Generació de malles

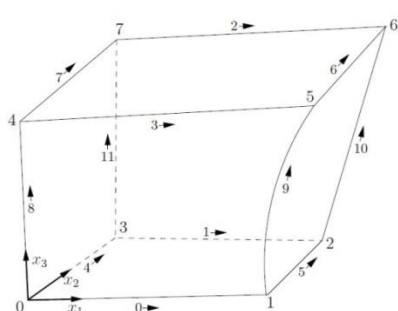
OpenFOAM disposa de tres eines per a la generació de malles tridimensionals; mitjançant blockMesh, snappyHexMesh o la conversió d'una malla generada amb un altre programa a un format compatible per OpenFoam.

blockMesh

Aquesta eina permet la creació de malles hexaèdriques simples (blocks) d'arestes rectes o corbes. Cada block es defineix per la posició en l'espai de 8 vèrtex i el numero de cel·les en cada una de les tres direccions del sistema de coordenades (x, y i z). La malla és generada per l'aplicació blockMesh al executar el diccionari blockMeshDict el qual es troba en el subdirectori System (o

constant/poliMesh) dintre del directori del cas de treball. Un cop executat aquest diccionari es creen els arxius points, faces, cells i boundary que defineix la malla creada. Dintre del blockMeshDict es troben diferents apartats que han de ser definits per l'usuari, aquests són:

- **convertToMeters:** serveix per indicar en quina unitat de longitud estan els vèrtexs. Per exemple, si el valor és 1 significa que la llista de vèrtex està en metres, si és 0.001 significa que els vèrtex estan en mm.
- **vertices:** llistat de vèrtex per descriure els blocks. Al posar els vèrtex en una llista aquests queden ordenats numèricament, el primer vèrtex de la llista és el numero 0 i correspon a l'origen de coordenades.



```
vertices
(
  ( 0 0 0 )
  ( 1 0 0.1 )
  ( 1.1 1 0.1 )
  ( 0 1 0.1 )
  (-0.1 -0.1 1 )
  ( 1.3 0 1.2 )
  ( 1.4 1.1 1.3 )
  ( 0 1 1.1 )
);
```

Figura 4.2. Block i corresponent llistat de vèrtexs en l'apartat vertices del blockMeshDict.

- **edges:** llistat d'arestes. Aquí es defineix el tipus d'unió entre cada parell de punts. S'ha d'indicar el tipus d'unió amb la keyword arc, spline, polyLine, BSpline o line seguit dels dos punts a unir i un llistat de punts en el cas de voler definir una corba entre els dos punts (en el cas d'una línia recta no s'ha d'especificar cap llistat de punts).

Keyword selection	Description	Additional entries	
arc	Circular arc	Single interpolation point	edges (arc 1 5 (1.1 0.0 0.5));
spline	Spline curve	List of interpolation points	
polyLine	Set of lines	List of interpolation points	
BSpline	B-spline curve	List of interpolation points	
line	Straight line	—	

Figura 4.3. Tipus d'arestes per unir els vèrtex.

- **blocks:** llistat de blocks. Cada block està definit per un llistat de 8 vèrtex, el numero de cel·les en cada direcció del sistema de coordenades i el cell expansion ratio en cada direcció del sistema de coordenades pel refinament de la malla.


```

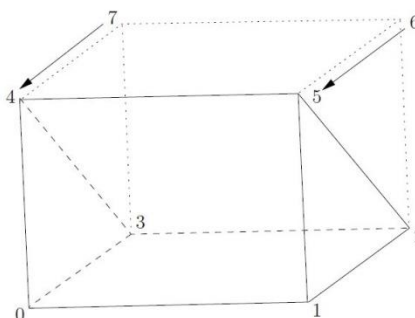
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7)
  (10 10 10)
  simpleGrading (1 2 3)
);

```

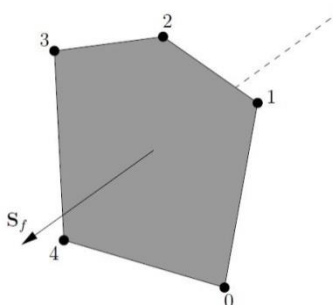
Figura 4.4. Definició del block de la Figura 4.2 a partir de 8 vèrtexs, el numero de cel·les i el grau de refinament en cada direcció del sistema de coordenades.

- En la Figura 4.4, que fa referència al block de la Figura 4.2, primer es té un llistat de vèrtex que comença amb 4 punts (0, 1, 2 i 3) que defineixen una de les cares de l'hexaedre i després es defineixen 4 punts més que defineixen la cara oposada a aquesta, tancant així l'hexaedre. Els 4 vèrtexs que defineixen la cara oposada (4, 5, 6 i 7) han d'estar ordenats de tal forma que ocupin la mateixa posició que el respectiu vèrtex (vèrtex al qual esta unit mitjançant una aresta; 0-4, 1-5, 2-6 i 3-7) en la cara que s'ha definit primer. En el cas anterior, en la cara oposada es té 4, 5, 6 i 7 sent els respectius vèrtex en la cara que s'ha definit primer 0, 1, 2, i 3. Es poden generar blocks de menys de 8 vèrtex seguint el mateix procediment anterior, un exemple es la imatge següent:

```
hex (0 1 2 3 4 5 5 4)
```

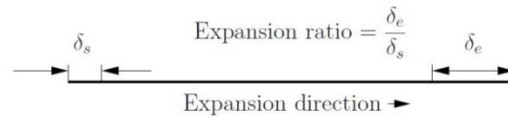


L'ordre en que es posen els vèrtex és important ja que ens indica el sentit del vector superfície normal a la cara que defineixen aquest punts. El sentit del vector normal a la cara es defineix per la regla de la mà dreta.



- A continuació s'indica un llistat de tres valors que indica el numero de cel·les en cada una de les direccions, en el cas anterior es tenen 10 cel·les per cada un dels eixos x, y i z.

- Finalment , continuant amb la Figura 4.4, es té el Cell Expansion Ratio que es pot definir de diferents formes. Per exemple, simpleGrading (1 2 3) crea un refinament on les cel·les adjacents a la cara que es vol refinar tindran una mida en la direcció x, y i z de 1, 2 i 3 vegades menor, respectivament, que les cel·les adjacents a la cara oposada.



En una mateixa direcció es pot realitzar més d'un grau de refinament. Per exemple, en el següent cas es té un expansion ratio constant de 1 i 3 en les direccions x i z, menters que en la direcció y es tenen tres refinaments diferents (4, 1 i 0.25) dividint la direcció en tres fraccions (20, 60 y 20 %). En aquest cas s'ha d'indicar en quina fracció de la direcció es vol aplicar un expansion ratio determinat i el nombre de cel·les en percentatge dintre d'aquesta fracció.

```
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (100 300 100)
  simpleGrading
  (
    1 // x-direction expansion ratio
    (
      (0.2 0.3 4) // 20% y-dir, 30% cells, expansion = 4
      (0.6 0.4 1) // 60% y-dir, 40% cells, expansion = 1
      (0.2 0.3 0.25) // 20% y-dir, 30% cells, expansion = 0.25 (1/4)
    )
    3 // z-direction expansion ratio
  )
);
```

- boundary: llistat de contorns geomètrics que seran utilitzats per aplicar-hi les condicions de contorn. Aquests contorns geomètrics estan definits pel seu nom, el tipus de contorn (wall, patch, empty, etc) i la cara o conjunt de cares que els conformen.

```
boundary // keyword
(
  inlet // patch name
  {
    type patch; // patch type for patch 0
    faces
    (
      (0 4 7 3) // block face in this patch
    );
  } // end of 0th patch definition
```

- mergePatchPairs: en aquest apartat opcional es defineix la connexió entre diferents blocks en el cas d'haver generat més d'un block.

En el cas de tenir dos blocks que comparteixen la mateixa cara (arestes i vèrtexs coincidents), si es vol convertir els dos blocks en un de sol no s'ha de definir aquesta cara comuna coma contorn geomètric en l'apartat boundary i d'aquesta forma queden units.

En el cas de tenir dos blocks que comparteixen la mateixa cara (no cal que les arestes i vèrtexs coincideixin en aquest cas), si es vol diferenciar entre dos contorns geomètrics diferents s'han de definir en l'apartat `boundary` i a dintre de l'apartat `mergePatchPairs` s'indicarà quina cara es vol sobreposar sobre l'altre. L'estructura és la de la imatge següent:

```
mergePatchPairs
(
    ( <masterPatch> <slavePatch> )
    ...
)
```

Per exemple, si es tenen dos cares (contorns geomètrics) anomenades en l'apartat `boundary` `Inlet` i `Tub`, i es vol sobreposar la cara `Inlet` sobre la cara `Tub`, s'ha de substituir `<masterPatch>` i `<slavePatch>` per `Inlet` i `Tub` respectivament.

snappyHexMesh

És un generador automàtic de malles tridimensionals de cel·les hexaèdriques. El mallat es crea al voltant o a l'interior de les `triangular-surface-geometries` (una geometria en format STL, OBJ o Nastran) donant la possibilitat de refinar el mallat en les zones properes a la superfície d'aquestes geometries. Un exemple pot ser un tub en el qual volem modelar el flux d'un fluid pel seu interior. A partir de la geometria del tub es pot mallar l'interior d'aquest de forma automàtica i amb la possibilitat de refinar les zones més properes a la paret (on normalment es necessiten mides de cel·la reduïdes pels alts gradients). El mateix OpenFOAM permet la generació de `triangular-surface-geometries`, aquestes poden ser `Box`, `Sphere`, `Cylinder` i `Plane`.

Per a utilitzar el `snappyHexMesh` es necessita:

- Un o més arxius `triangular-surface-geometries` en el subdirectori `/constant/trisurface` dintre del directori del cas d'estudi.
- Una malla simple de hexaedres amb un `aspect-ratio` aproximadament de 1 (totes les cel·les de la malla base han de tenir la mateixa mida arroximadament). Aquesta malla ha de interferir amb les `triangular-surface-geometries`. Es recomana el `blockMesh` per a la generació d'aquesta malla base.
- Tenir el diccionari `snappyHexMeshDict` en el subdirectori `/System` dintre del directori del cas d'estudi.

Dintre del `snappyHexMeshDict` s'han d'indicar els diferents paràmetres que defineixen el mallat. Dintre d'aquest arxiu es troben els apartats principals `geometry`, `castellatedMeshControls`, `snapControls`, `addLayersControls` i `meshQualityControls`. L'arxiu `snappyHexMeshDic` exemple que es mostra a continuació està basat en la malla d'un model bidimensional que correspon a una secció de

0.03 m de gruix d'un dels Racks que es troben dintre de la BTS. A continuació es procedeix a descriure cada part de l'arxiu:

- Primer es té una capçalera on es poden desactivar o activar els diferents passos del mallat automàtic. Per exemple, es pot posar l'apartat `addLayers` a `false` i això farà que l'executable es salti aquest procés.

```
FoamFile
// en els arxius OpenFOAM es poden fer línies de comentaris escrivint "//" en la
// línia que volem comentar. Quan comentem el programa llegeix l'arxiu saltant-se
// aquestes línies.
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    location system;
    object snappyHexMeshDict;
}

castellatedMesh true;
snap true;
addLayers true;
```

- **geometry:** Aquí es defineixen les geometries utilitzades pel mallat.

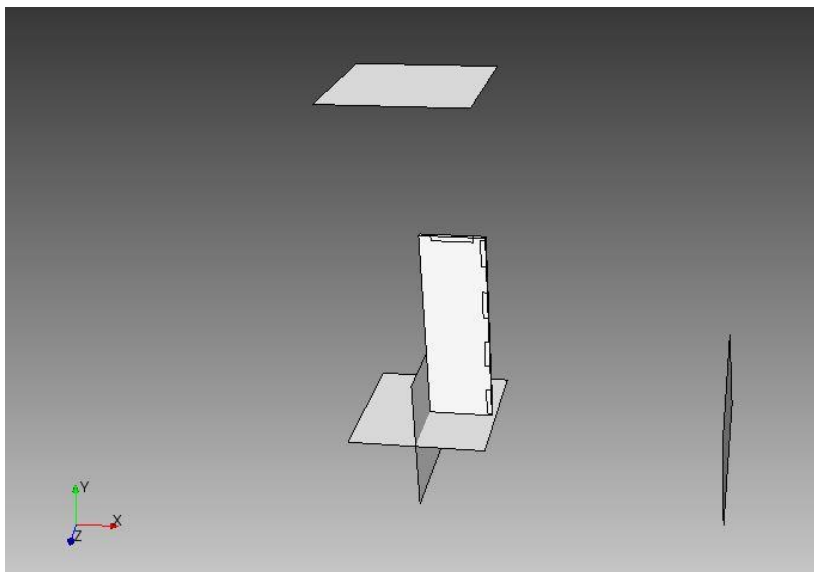


Figura 4.5. Geometria d'estudi. Secció de 0.03 m de gruix d'un Rack amb 4 entrades, 1 sortida i 4 plans per a les parets de l'estança.

```
geometry
{
    Rack
// nom de la geometria
{
    type searchableBox;
```

```
// Tipus de la geometria seachableBox: és un cub definit per tres artistes.
// L'aresta en l'eix de les x va del punt (0.0 0.0 0.0) al (0.47 0.0 0.0), en
// l'eix de les y va del punt (0.0 0.0 0.0) al (0.0 1.435 0.0) i en l'eix de les z
// va del punt (0.0 0.0 0.0) al (0.0 0.0 0.03).
    min ( 0.0 0.0 0.0 );
    max ( 0.47 1.435 0.03 );
}
RackInlet
{
    type seachableBox;
    min ( 0.085 1.4 0.0 );
    max ( 0.385 1.435 0.03 );
}
RackOutlet1
{
    type seachableBox;
    min ( 0.435 0.0175 0.0 );
    max ( 0.47 0.2175 0.03 );
}
RackOutlet2
{
    type seachableBox;
    min ( 0.435 0.4175 0.0 );
    max ( 0.47 0.6175 0.03 );
}
RackOutlet3
{
    type seachableBox;
    min ( 0.435 0.8175 0.0 );
    max ( 0.47 1.0175 0.03 );
}
RackOutlet4
{
    type seachableBox;
    min ( 0.435 1.2175 0.0 );
    max ( 0.47 1.4175 0.03 );
}
Sostre
{
    type seachablePlane;
// Tipus de la geometria seachablePlane.
    planeType pointAndNormal;
// Aquí s'indica com es vol definir el pla. En aquest cas a partir d'un punt i
// una direcció normal.
    pointAndNormalDict
    {
        basePoint ( 0.0 2.5 0.0 );
        normalVector ( 0.0 1.0 0.0 );
// Aquest pla està col·locat a 2.5 m en l'eix de les y.
    }
}
Terra
{
    type seachablePlane;
    planeType pointAndNormal;
    pointAndNormalDict
    {
        basePoint ( 0.0 0.0 0.0 );
        normalVector ( 0.0 1.0 0.0 );
    }
}
ParetEsquerra
{
    type seachablePlane;
```

```

planeType pointAndNormal;
pointAndNormalDict
{
    basePoint ( 0.0 0.0 0.0 );
    normalVector ( 1.0 0.0 0.0 );
}
}
ParetDreta
{
    type searchablePlane;
    planeType pointAndNormal;
    pointAndNormalDict
    {
        basePoint ( 2.2 0.0 0.0 );
        normalVector ( 1.0 0.0 0.0 );
    }
}
}

```

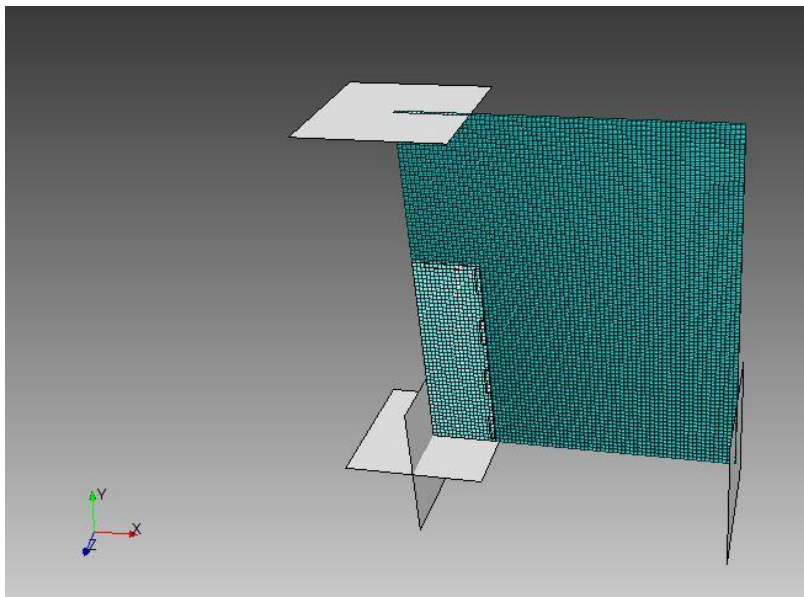


Figura 4.6. Geometria d'estudi i malla simple generada amb blockMesh de $2.2 \times 2.5 \times 0.03 \text{ m}^3$ amb una mida de cel·la de $0.03 \times 0.03 \times 0.03 \text{ m}^3$.

En el cas anterior totes les geometries han set creades. En el cas de voler importar una geometria, per exemple la geometria cotxe.stl guardada prèviament en la carpeta /constant/trisurface amb el nom cotxe, s'han d'afegir les següents línies dintre de l'apartat geometry..

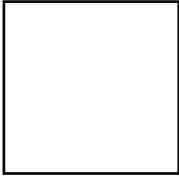
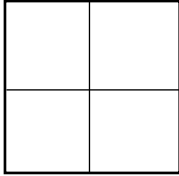
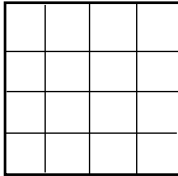
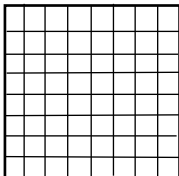
```

cotxe.stl
{
    type triSurfaceMesh;
    name cotxe;
}

```

- **castellatedMeshControls:** S'estableixen diferents paràmetres que defineixen el refinament de la malla. Per al refinament s'utilitza el concepte de Level (nivell de refinament) que fa

referència al grau de divisions de les cel·les originals. Per a Level 0 no es fa cap divisió, Level 1 es divideixen les cel·les de la cel·la per 2^1 , Level 2 es divideixen per 2^2 , i així consecutivament.

	Level 0 (original)	Level 1	Level 2	Level 3
	0.03 m	0.015 m	0.0075 m	0.00375 m
Mida de cel·la				

```
castellatedMeshControls
{
    features
    (
    );
    refinementSurfaces
    // En aquest exemple no es crea cap refinament superficial.
    {
        Rack
        {
            level ( 0 0 );
        }
        RackInlet
        {
            level ( 0 0 );
        }
        RackOutlet1
        {
            level ( 0 0 );
        }
        RackOutlet2
        {
            level ( 0 0 );
        }
        RackOutlet3
        {
            level ( 0 0 );
        }
        RackOutlet4
        {
            level ( 0 0 );
        }
        Sostre
        {
            level ( 0 0 );
        }
        Terra
        {
            level ( 0 0 );
        }
        ParetEsquerra
```

```

    {
        level ( 0 0 );
    }
    ParetDreta
    {
        level ( 0 0 );
    }
}

refinementRegions
// Aquí es defineix el refinament volumètric al voltat d'una geometria.
{
    Rack
    {
        mode distance;
// En aquest mode es defineix el Level i la Distance. S'indica quin grau de
// refinament es vol i fins a quina distancia respecte de la geometria. Es poden
// fer diferents nivells de refinament a diferents distàncies, aquestes han
// d'estar ordenades de menor a major distancia i de menor a major mida de
// cel·la (de major a menor Level).
        levels (( 0.02 4 ) ( 0.04 3 ) ( 0.1 2 ) ( 0.3 1 ) );
// Al voltant de la geometria Rack es tenen 4 nivells de refinament.
// Es té un nivell de refinament de 4 al voltat del Rack fins a una distancia de
// 0.02 m. Després un nivell de refinament de 3 fins a 0.04 m, un nivell 2
// fins a 0.1 m i finalment un nivell de 1 fins a 0.3 m
    }
    Sostre
    {
        mode distance;
        levels (( 0.02 4 ) ( 0.04 3 ) ( 0.1 2 ) ( 0.3 1 ) );
    }
    Terra
    {
        mode distance;
        levels (( 0.02 4 ) ( 0.04 3 ) ( 0.1 2 ) ( 0.3 1 ) );
    }
    ParetEsquerra
    {
        mode distance;
        levels (( 0.02 4 ) ( 0.04 3 ) ( 0.1 2 ) ( 0.3 1 ) );
    }
    ParetDreta
    {
        mode distance;
        levels (( 0.02 4 ) ( 0.04 3 ) ( 0.1 2 ) ( 0.3 1 ) );
    }
}

```

En l'exemple que s'està analitzant es volen aproximadament 10 cel·les de 0.002 m a prop de les parets a parit d'una malla base de cel·les de 0.03 m. Per aquest motiu es tria un Level de 4 el qual dona una mida de cel·la de $0.03 / 2^4 = 0.001875$ m (0.002 aproximadament). Multiplicant aquest valor pel nombre de cel·les en la direcció normal a la paret que es volen es té la distancia; $0.001875 \cdot 10 = 0.01875$ m (0.02 m aproximadament).

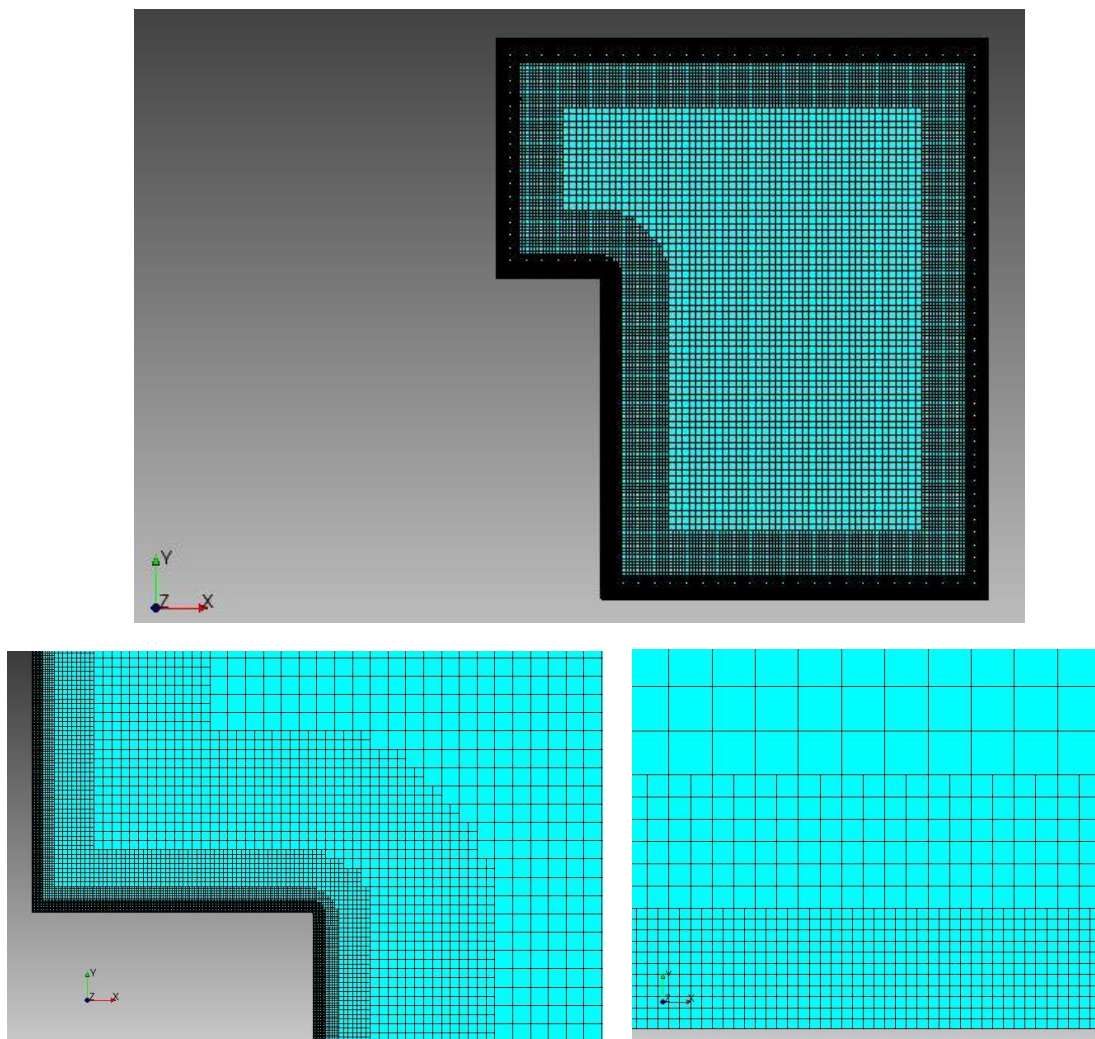


Figura 4.7. Refinament volumètric a partir del refinementRegions.

```
locationInMesh ( 1.2 1.8 0.015 );
// Aquest punt (punt material) serveix per indicar quina part es vol mallar. Fins
// ara es té una malla base sense refinament i un conjunt de geometries
// que interfereixen amb aquesta. Si aquest punt esta col·locat dintre de una de
// les geometries el que s'està indicant és que es vol aplicar el snappyHexMesh a
// la part interna d'aquestes geometries. Si pel contrari aquest punt es troba a
// fora de les geometries (es troba en la malla base sense refinament) s'està
// indicant que es vol aplicar el snappyHexMesh en la zona exterior de les
// geometries.
// En aquest cas el punt material es troba a la coordenada (1.2 1.8 0.015) que
// coincideix amb la regió on es té definida la malla base sense interferència
// amb les geometries. Per tant, el que s'està indicant és que es vol aplicar el
// snappyHexMesh a la zona externa al Rack (a l'estança).
```

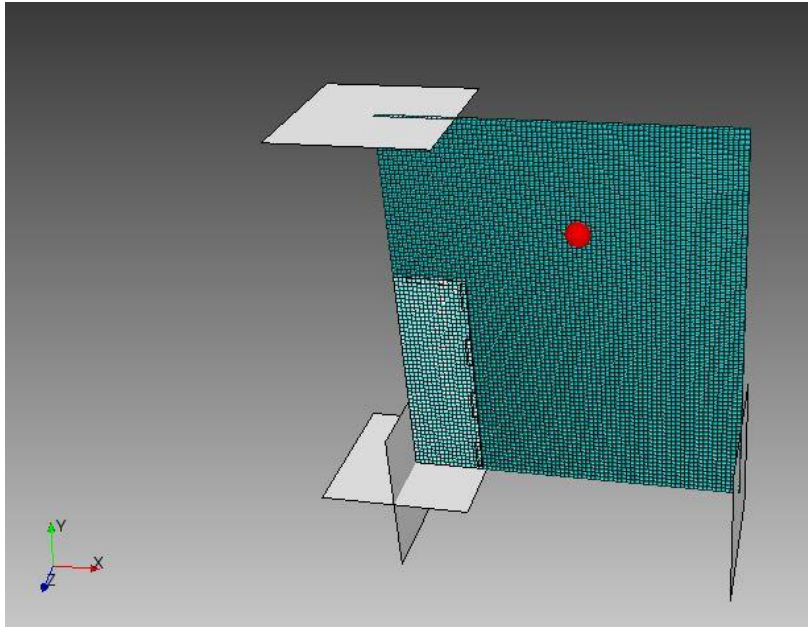


Figura 4.8. Geometria d'estudi, malla simple generada amb blockMesh i punt material (bola vermella) fora de la geometria.

```
maxLocalCells 100000;
maxGlobalCells 2000000;
// En els dos apartats anteriors es pot indicar que si es preveu un numero de
cel·les major al indicat l'aplicació deixi de refinar la malla.
minRefinementCells 0;
nCellsBetweenLevels 1;
resolveFeatureAngle 30;
allowFreeStandingZoneFaces true;
planarAngle 30;
maxLoadUnbalance 0.10;
```

- **snapControls:** Aquí es defineix el procés d'unió entre la malla y la superfície de les triangular-surface-geometries. Els vèrtex de la malla més propers a la superfície s'uneixen a aquesta.

```
snapControls
// En aquest exemple es deixen les condicions per defecte.
{
    nSolveIter 30;
    nSmoothPatch 3;
    tolerance 2.0;
    nRelaxIter 5;
    nFeatureSnapIter 10;
    implicitFeatureSnap false;
    explicitFeatureSnap true;
    multiRegionFeatureSnap false;
}
```

- **addLayersControls:** Un cop fet el mallat es poden afegir capes de cel·les de gruix controlat en superfícies que seran utilitzades com a condició de contorn. En aquest apartat s'especifica el numero de capes i el gruix d'aquestes.

```

addLayersControls
{
    layers
    {
// En aquest exemple no s'afegeixen capes.
    }
    relativeSizes true;
// es treballa amb mides relatives
    expansionRatio 1.0;
// Si es defineix aquest ratio només s'ha d'especificar finalLayerThickness o
// minThickness, però no els dos. En el cas contrari estarà sobre definit.
    finalLayerThickness 0.3;
// Gruix de la capa més gruixuda ( si la mida inicial de la capa era 2 mm després
// del refinament serà  $2 \cdot 0.3 = 0.6$  mm ).
    minThickness 0.25;
// Gruix de la capa més prima.
    nGrow 0;
// Aquí es defineix el numero de capes. En aquest cas esta a 0 ja que no
// s'afegeixen capes.
    featureAngle 130;
    slipFeatureAngle 30;
    nRelaxIter 5;
    nSmoothSurfaceNormals 1;
    nSmoothNormals 3;
    nSmoothThickness 10;
    maxFaceThicknessRatio 0.5;
    maxThicknessToMedialRatio 0.3;
    minMedialAxisAngle 90;
    nBufferCellsNoExtrude 0;
    nLayerIter 50;
    nRelaxedIter 20;
    writeVTK false;
    noErrors false;
    layerRecovery 1;
    growZoneLayers false;
    projectGrownUp 0.0;
    }
}

```

- **meshQualityControls:** S'indiquen diferents paràmetres pel control de la qualitat de la malla.

```

meshQualityControls
// En aquest exemple es deixen les condicions per defecte.
{
    maxNonOrtho 65;
    maxBoundarySkewness 20;
    maxInternalSkewness 4;
    maxConcave 80;
    minFlatness 0.5;
    minVol 1.00E-13;
    minTetQuality 1e-15;
    minArea -1;
    minTwist 0.02;
    minDeterminant 0.001;
    minFaceWeight 0.05;
    minVolRatio 0.01;
    minTriangleTwist -1;
    nSmoothScale 4;
    errorReduction 0.75;
    relaxed
    {
        maxNonOrtho 75;
    }
}

```

```

    }
}
debug 0;
mergeTolerance 1E-6;
autoBlockMesh false;

```

Per a la realització del mallat en OpenFOAM es recomana l'ús de d'interfície Helyx-OS. Aquesta permet generar i omplir tots els arxius indicat anteriorment d'una forma molt senzilla i intuïtiva. En l'apartat 4.3 d'aquest capítol es fa una explicació detallada de la utilització d'aquesta eina.

Conversió de malles generades amb altres programes a format OpenFOAM

Es permet la conversió de malles construïdes amb altres programes a format OpenFOAM. Per convertir una malla s'ha d'executar en el directori del cas la comanda (veure apartat 3.6.3 de la referència 1) seguida del nom de l'arxiu que es vol convertir.

Per exemple, si es vol convertir la malla Malla1.msh realitzada amb el programa CFX 4 s'ha d'executar la següent comanda: `cfx4ToFoam Malla1`

Un cop obtinguda la malla es recomana executar el `checkMesh` i comprovar que el nombre de cel·les i els límits (cotes x, y i z màximes) de la malla en format OpenFOAM són els mateixos que es tenien en la malla original.

4.2.4. Condicions de contorn estàndard

A continuació es descriuen algunes de les condicions de contorn estàndard que ofereix OpenFOAM i que podrien ser utilitzades en aquest treball. Per un llistat de totes les condicions de contorn es pot accedir al subdirectori `src/finiteVolume/fields/fvPatchFields` en el directori on es té instal·lat OpenFOAM.

Contorns geomètrics (constraint):

Els principals contorns geomètrics són:

- `patch`: Contorn geomètric genèric utilitzat, per exemple, per establir-hi condicions d'entrada o sortides de fluid. Les entrades i sortides d'aire en un Rack seran `patch`.
- `wall`: Utilitzat per a modelar parets.
- `symmetryPlane`: Utilitzat en el cas de voler indicar un pla de simetria en el model.
- `Symmetry`: Utilitzat per indicar simetria respecte a qualsevol geometria (no ha de ser un pla necessàriament).
- `empty`: Utilitzat per modelar solucions unidimensionals (1D) o bidimensional (2D). El codi de OpenFOAM està dissenyat per a models tridimensionals (utilitza el mètode dels volums finits, FVM) però afegeix contorns geomètrics per poder simular models 1D o 2D.

La condició empty indica en quina direcció del sistema de coordenades no es vol resoldre les equacions. En aquesta direcció només es pot tenir **una cel·la** que ha de ser un **prisma recte amb les arestes laterals paral·leles a la direcció que es vol inhabilitar**. Per exemple, en una malla 3D amb N cel·les en la direcció de les x, M en la direcció de les y i 1 en la direcció de les Z, es pot establir la condició empty a les dos cares normals a la direcció Z (les quals es troben separades per una cel·la). D'aquesta forma el que s'està indicant és que es tracta d'un model 2D i es volen resoldre les equacions en la direcció x i y inhabilitant la direcció z.

- wedge: Utilitzat per models axisimètrics 2D.
- cyclic: Contorn utilitzat per tracta diferents superfícies com si estiguessis connectades físicament; el que surt d'una d'elles entra a l'altre. S'utilitza en models on es tenen geometries molt repetitives (que segueixen un patró). Un exemple és la Figura 4.9.

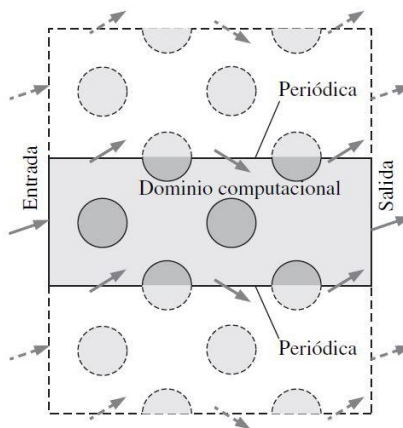


Figura 4.9. Contorn geomètric periòdic (cyclic per a OpenFOAM) per a un intercanviador de calor (Font: Referencia 14, Figura 15-22) .

Condicions de contorn bàsiques

- fixedValue: El valor de la variable és especificada per l'usuari i es manté constant durant tota la simulació.
- fixedGradient: El gradient ($\nabla \cdot f = \text{constant}$) de la variable és especificat i es manté constant durant tota la simulació.
- zeroGradient: El gradient ($\nabla \cdot f = 0$) de la variable és 0.
- mixed: Condició de contorn que passa de fixedValue a fixedGradient depenent d'un valor llindar (valueFraction). Per exemple quan valueFraction és 1 s'aplica la condició de contorn fixedValue i quan és 0 s'aplica la de fixedGradient. Per exemple, en una patch que pot fer d'entrada (valueFraction = 1) o de sortida (valueFraction = 0) de fluid en el domini, s'aplica fixedValue quan el fluid entre i zeroGradient (fixedGradient de valor nul) quan el fluid surt.

- groovyBC: Aquesta condició de contorn permet definir condicions de contorn a partir d'expressions algebraiques definides per l'usuari, d'altres condicions de contorn o de les mateixes variables del flux. Per exemple, aquesta condició de contorn s'utilitza en aquest treball per a la temperatura de sortida de l'aire en els Racks la qual depèn de la temperatura de l'aire a l'entrada dels Rack. Per a utilitzar aquesta condició de contorn s'ha d'instal·lar la llibreria swak4Foam .

Condicions de contorn per a entrades i sortides (Inlet i Outlet)

Establint com a contorn geomètric patch, es tenen les següents condicions de contorn per a una entrada:

- fixedFluxPressure: La pressió es calcula a parit del flux. A l'entrada o sortida on s'aplica aquesta condició de contorn s'ha d'especificar la velocitat (o el cabal).
- pressureInletOutletVelocity: La velocitat es calcula a partir del flux. Si el fluid surt del domini s'aplica zeroGradient (serveix per evitar fluxos reversibles; que el que s'havia establert com a entrada es comporti com a sortida, o viceversa) a la velocitat i si el fluid entra al domini es calcula la velocitat a partir del flux en les cel·les normals a la superfície on s'estableix la condició de contorn. La velocitat obtinguda és normal a la superfície. El conveni de signes és: velocitats positives per a fluxos entrants al domini i velocitats negatives per a fluxos sortints.
- pressureInletVelocity: La velocitat es calcula a partir del flux. Es calcula la velocitat a partir del flux en les cel·les normals a la superfície de la condició de contorn. La velocitat obtinguda és normal a la superfície. Si el flux pot ser reversible es recomana l'ús de pressureInletOutletVelocity.
- flowRateInletVelocity: Es pot establir la velocitat definint el cabal màssic o volumètric .
- outletInlet: La velocitat a l'entrada és calculada a partir de la velocitat a la sortida. Es genera un flux a l'entrada de tal forma que s'evita el flux reversible en la sortida.
- inletOutlet: La velocitat a la sortida és calculada a partir de la velocitat a l'entrada. Es genera un flux a la sortida de tal forma que s'evita el flux reversible en l'entrada.
- totalPressure: S'especifica la pressió total i la pressió estàtica és calculada a partir del flux. La pressió total és la suma de la pressió estàtica i la pressió dinàmica ($p_0 = p + \frac{1}{2}\rho c^2$, p_0 és la pressió total, p la pressió estàtica, ρ la densitat i c la velocitat. En el cas de l'aire considerat com a incompressible s'ha d'especificar Gamma ($\frac{c_p}{c_v}$) de valor 1.4 per l'aire com a gas ideal.
- surfaceNormalFixedValue: Serveix per establir un valor fix d'una magnitud física en la direcció normal a la superfície.

Condicions de contorn per a parets (Wall)

- `fixedFluxPressure`: La pressió a la paret s'especifica a parit del flux.
- `noSlip`: Condició de no lliscament. La velocitat del fluid en contacte amb les paret és 0.
- `slip`: Condició de lliscament. La velocitat del fluid en contacte amb les parets ve definida pel camp de velocitats dintre del domini.
- `partialSlip`: Condició de lliscament parcial. L'usuari pot indicar quin grau de lliscament tenen les parets.
- `movingWallVelocity`: Serveix per modelar parets en moviment rectilini.
- `rotatingWallVelocity`: Serveix per modelar parets en moviment rotatori.

Les condicions de contorn definides fins ara no estan en funció del temps. Hi ha la possibilitat d'introduir condicions de contorn en funció del temps a partir de funcions o taules.

4.2.5. Execució de les aplicacions

A continuació es descriuen alguns dels executables que es consideren importants per aquest treball. La forma d'executar una aplicació és escrivint en la terminal la comanda que fa referencia a l'execució de l'aplicació. Totes les execucions s'han de fer sempre des del directori del cas (per exemple, en la Figura 4.1 seria dintre la carpeta `NouCas`).

Mallat

Pel mallat es tenen dos executables principals que ja s'han comentant anteriorment. Un és el `blockMesh` que executa el diccionari `blockMeshDict` per la malla base i el `sappyHexMesh` que executa el diccionari `snappyHexMeshDict` per la manipulació de la malla base.

Solver

OpenFoam ofereix una gran varietat de solvers estàndards. Aquests solvers s'executen utilitzant l'executable que porta el mateix nom que el solver. Per exemple, en un càlcul utilitzant un sol core, s'executa el solver `buoyantPimpleFoam` amb la comanda:

```
buoyantPimpleFoam
```

Executar aplicacions en paral·lel (més d'un core)

Un dels avantatges de OpenFOAM és que permet la descomposició del domini de treball per que aquest pugui ser calculat en paral·lel per diferents cores. La descomposició d'un model està definida en el diccionari `decomposeParDict` (el qual s'ha de trobar en el subdirectori `/system`). La descomposició es realitza indicant en el `decomposeParDict` el numero de subdominis que es vol

(numero de cores que s'utilitzaran; numberOfSubdomains), el mètode de descomposició (simple, hierarchical o manual) i la forma de descomposició en el sistema de coordenades ($n = n^o$ de subdominis en l'eix de les x, n^o de subdominis en l'eix de les y, n^o de subdominis en l'eix de les z).

```

numberOfSubdomains 4;
method              simple;
simpleCoeffs
{
    n                (2 2 1);
    delta            0.001;
}
hierarchicalCoeffs
{
    n                (1 1 1);
    delta            0.001;
    order            xyz;
}
manualCoeffs
{
    dataFile         "";
}
distributed         no;
roots               ( );

```

Figura 4.10. Diccionari decomposeParDict on l'usuari ha descompost el domini en 4. S'ha utilitzat el method simple dividint el domini en 2 en la direcció x, 2 en la direcció y i 1 (cap divisió) en la direcció z obtenint així $2 \times 2 \times 1 = 4$ subdominis.

Un cop definida la descomposició, s'ha d'executar el diccionari amb l'executable següent:

```
decomposePar
```

Per a executar un aplicació en paral·lel s'ha d'utilitzar la comanda següent:

```
mpirun -np <numero de processadors> <executable> -parallel > <nom arxiu control
execució>.log
```

Per exemple, si es vol executar el solver buoyantPimpleFoam amb 4 processadors i crear l'arxiu Control per controlar l'execució, es procediria de la forma següent:

```
mpirun -np 4 buoyantPimpleFoam -parallel > Control.log
```

Per reconstruir el domini per visualitzar resultats s'ha d'executar la següent comanda:

```
reconstructPar
```

Si només és vol visualitzar reconstruir l'últim instant de temps s'ha d'utilitzar

```
recostructPar -latestTime
```


Post-Processat amb ParaView

OpenFOAM té integrat ParaView com a programa de Post-Processat predeterminat. Per a executar la visualització de resultats amb ParaView s'ha d'utilitzar la comanda:

```
paraFoam
```

Si s'ha fet un càlcul en paral·lel, per la visualització de resultats primer s'ha de reconstruir el domini amb la comanda `reconstructPar` indicada en l'apartat anterior.

4.3. OpenFOAM utilitzant Helyx-OS com a interfície gràfica d'usuari

Per a la realització de les simulacions d'aquest treball s'ha buscat una interfície gràfica d'usuari de llicència lliure que faciliti l'ús de la llibreria OpenFOAM. En plataforma Windows s'ha provat `simFlow`, la qual disposa de bona documentació per aprendre a utilitzar-la. La versió gratuïta de `simFlow` no deixa fer estudis de models que tinguin malles de més de 100000 nodes, una limitació que impedeix l'estudi de cap model CFD mitjanament seriós. Descartada aquesta opció es decideix utilitzar `Helyx-OS`, la qual té una versió gratuïta per a Linux sense cap tipus de limitació tot i que no hi ha documentació de suport.

4.3.1. Helyx-OS

`Helyx-OS` es una interfície gràfica d'usuari (GUI) de codi obert que treballa amb la llibreria OpenFOAM per a simulacions de CFD. Aquesta interfície està dissenyada per ENGYS utilitzant Java+VTK i lliurada al públic sota la llicència pública GNU GPL. `Helyx-OS` en plataforma Linux és la única interfície gratuïta que ofereix ENGYS, les altres (per exemple, `Helyx` o `Elements`) són de pagament.

Aquesta interfície gràfica ha estat dissenyada per treballar amb la llibreria OpenFOAM d'una forma més amigable i interactiva amb l'usuari reduint així la complexitat (probabilitat de cometre errors) de operar directament sobre els arxius de text que ofereix OpenFOAM. La interfície inclou totes les eines de pre-processament; creació de geometries, malles, condicions de contorn, elecció de solvers, etc. Per el post-processat es recomana l'ús de ParaView (llicència lliure i compatible amb Linux i Windows).

Solvers suportats per `Helyx-OS` actualment:

- Flux incompressible: `simpleFoam`, `pimpleFoam` i `pisoFoam` amb `fvOptions` per a MRF (Moving Reference Frame, es un solver per a simular règims estacionaris de maquines rotatòries) i modelatge de medis porosos.

- Flux Compressible ($Ma < 1$): rhoSimpleFoam i rhoPimpleFoam amb fvOptions per MRF i modelatge de medis porosos.
- Flux Compressible ($Ma > 1$): sonicFoam
- Transferència de calor i convecció natural: buoyantSimpleFoam, buoyantPimpleFoam, buoyantBoussinesqSimpleFoam i buoyantBoussinesqPimpleFoam amb fvOptions per MRF i modelatge de medis porosos.
- Flux multi fàsic de superfície lliure: interFoam
- Malles dinàmiques: pimpleDyMFoam, rhoPimpleDyMFoam i interDyMFoam

El codi font, els arxius binaris per a Linux i les instruccions d'instal·lació es troben a la pàgina oficial.

4.3.2. Estructura de la interfície

La interfície esta organitzada en 3 blocs principals que ajuden a l'usuari a crear el models d'una forma metòdica. Aquest són:

Mesh: Destinat a la creació de la malla: Es permet la generació de malles base, geometries i diferents tipus de refinament. Aquest apartat s'explica en més detall en l'apartat 4.3.3.

Case Setup: Un cop es té la malla, aquí s'acaba de definir el model. Consta de 7 apartats:

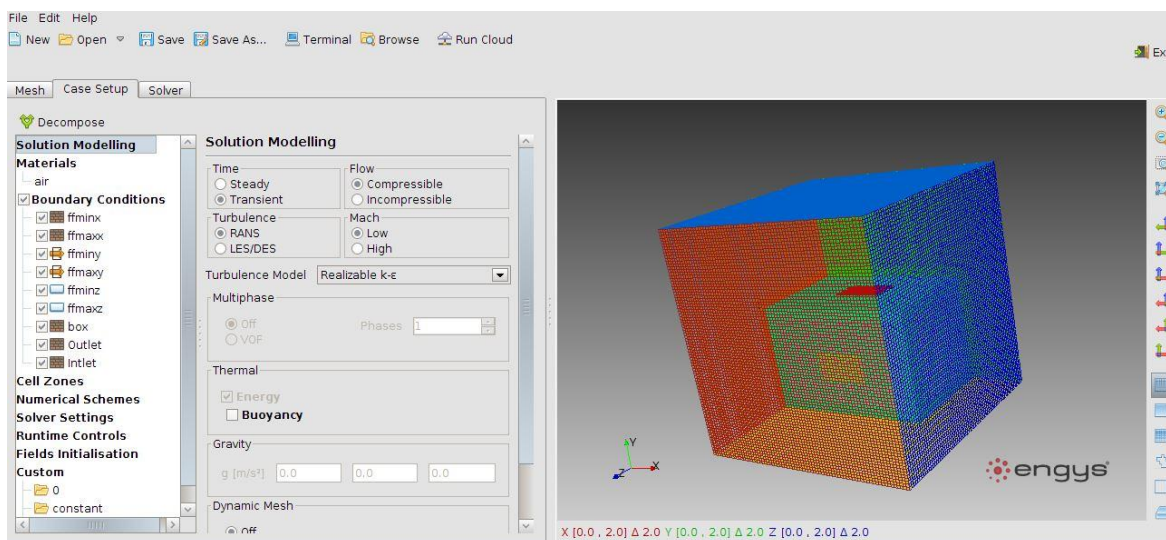


Figura 4.11. Bloc Case Setup de la interfície Helyx-OS.

- Solution Modeling: Es defineix si es tracta d'un problema en regim transitori o estacionari, el tipus de flux (compressible o incompressible), el model de turbulència, entre altres. Cal anar amb compte ja que cada vegada que es modifica aquest apartat tots

els següent es modifiquen a un nou estat per defecte. Per tant, és importat primer definir aquest apartat i després definir els següents.

- **Material:** Es tria les propietats del material del medi a modelar.
- **Boundary Conditions:** S'estableixen les condicions de contorn en les diferents superfícies que s'han generat en el mallat.
- **Cell Zones:** S'indica el medi de la Cell Zone (si es tracta d'un medi porus, una malla en moviment, una font de calor o un MRF) en cas d'haver creat una Cell Zone en la malla.
- **Numerical Schemes:** Aquí es defineixen diferents paràmetres relacionats amb els mètodes numèrics utilitzats per resoldre les equacions diferencials que governen la mecànica de fluids del model.
- **Solver Settings:** Apareixen els diferents paràmetres que controlen els mètodes numèrics triats, com per exemple la tolerància dels residus (error).
- **Runtime Controls:** Es defineix el temps d'inicialització i finalització de la simulació, freqüència en que es volen guardar els resultats, el numero de Courant (recomanable que estigui per sota de 1 per a una bona convergència en règim transitori), el deltaT (el qual esta relacionat amb el numero de Courant) i d'altres.
- **Fields Initialisation:** Apartat destinat a inicialitzar les propietats físiques del medi (camp) de treball; camp de velocitats, pressió, temperatura, energia cinètica turbulenta, etc.

Solver: Apartat on s'executa el solver. Al executar el solver ens apareix una terminal que ens dona informació de l'evolució de la simulació (temps de simulació, temps de rellotge, numero de Courant, etc). També mostra una pantalla amb l'evolució dels residus per a cada una de les equacions que s'estan resolent.

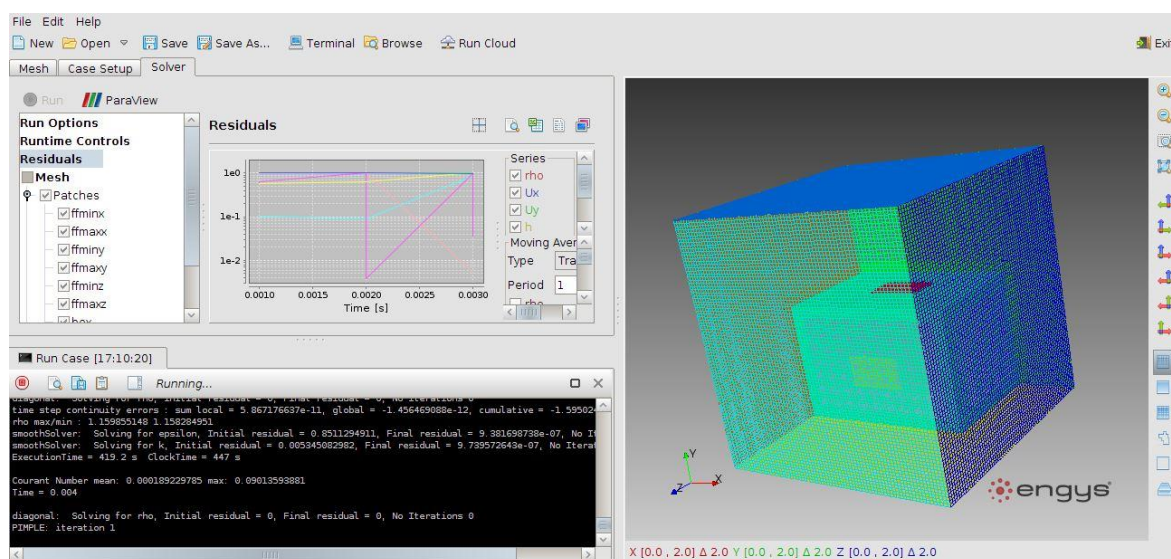


Figura 4.12. Bloc Solver de la interfície Helyx-OS.

4.3.3. Mallat amb Helyx-OS - snappyHexMesh

Base Mesh

En el primer apartat del bloc Mesh es té el Base Mesh on es defineix la malla base, una malla simple d'hexaedres que serà utilitzada per generar la malla refinada amb snappyHexMesh. Aquesta malla base pot ser de tres tipus diferents segons la manera de generar-la:

- Automàticament. Aquesta opció necessita més temps de càlcul que les altres dos.
- Definida per l'usuari, tal com mostra la Figura 4.13. D'aquesta forma es defineixen les 6 cares d'un hexaedre i el numero de cel·les dintre d'aquest.
- Importada.

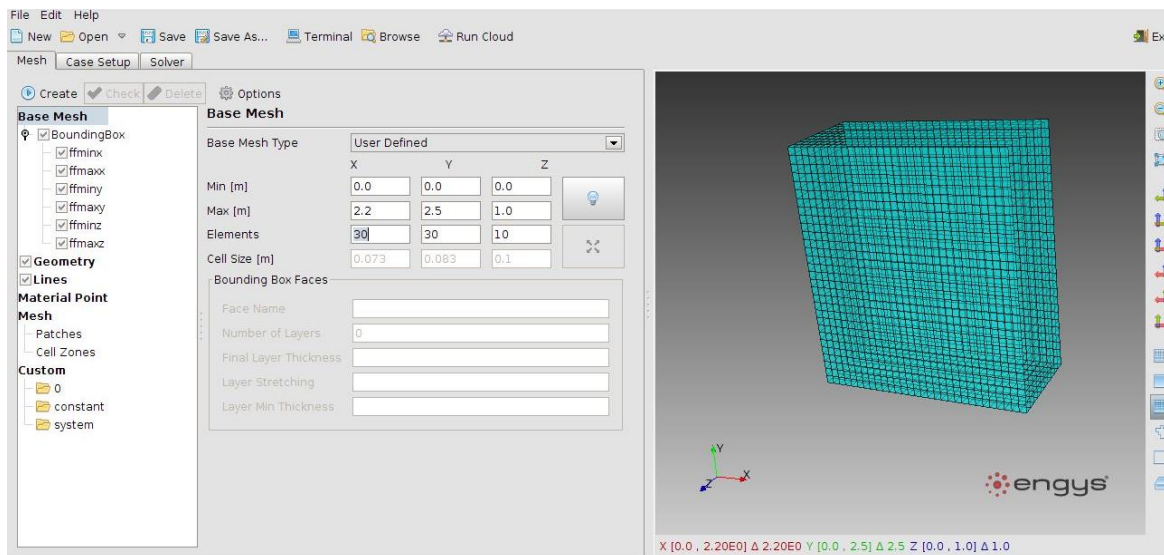


Figura 4.13. Base Mesh definida per l'usuari.

Quan l'usuari defineix la mida de l'hexaedre i el numero de cel·les es generen 6 cares (BoundaringBox) que poden ser utilitzades per establir-hi condicions de contorn. Si és d'interès es poden refinar les zones properes a aquestes cares afegint capes tot i que **no es recomana** si la finalitat d'aquesta malla base és utilitzar-la per mallar l'interior o l'exterior d'una geometria amb snappyHesMesh. Si es selecciona per exemple la cara ffmíny, s'afegeixen 10 capes, amb un gruix final igual al 90% del gruix de la cel·la original i un factor de reducció de capa de 1.25, es té la malla mostrada en la Figura 4.14. Això mateix es pot fer en totes les altres cares.

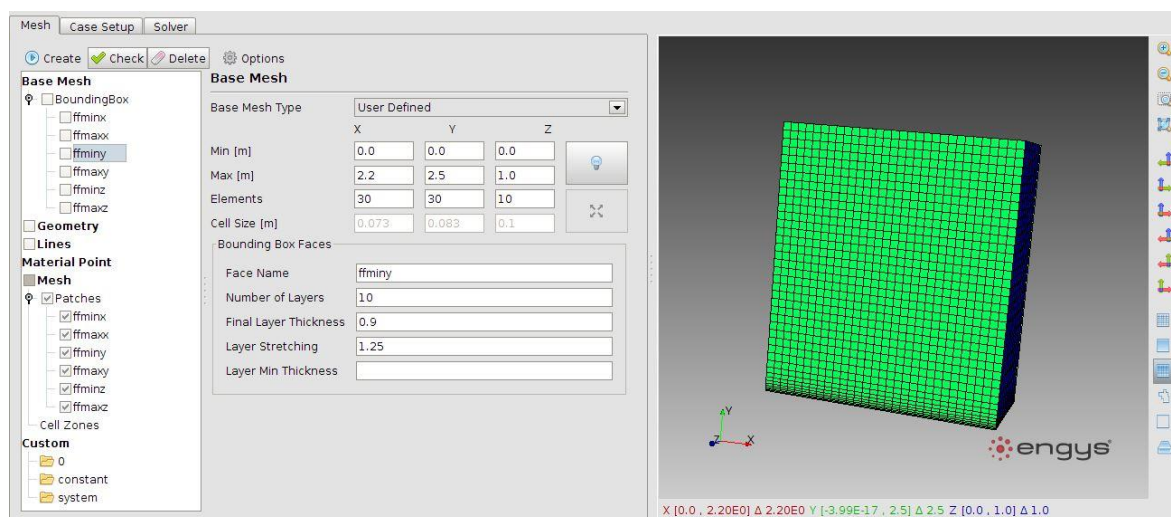


Figura 4.14. Base Mesh amb refinament a les cel·les adjacent a la cara ffminy.

Geometry

En aquest apartat s'introdueixen les triangular-surface-geometries. Poden ser generades (geometries cilíndriques, esfèriques, hexaèdriques i plans) o importades amb el botó STL que apareix en la interfície (els formats compatibles són STL, OBJ o Nastran). Quan s'importa una geometria el programa et permet rotar, traslladar o escalar la geometria dintre del sistema de coordenades en el que es col·loca.

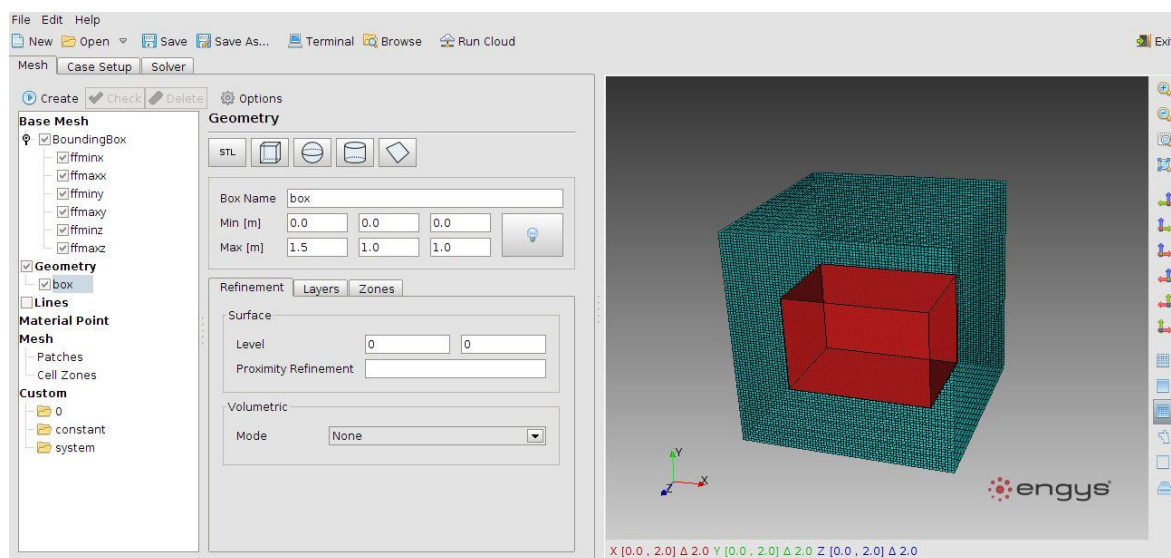


Figura 4.15. Creació d'un hexaedre de $1.5 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ dintre de la Base Mesh.

Les superfícies (Patch) que serviran per establir les condicions de contorn es generen en la interferència de la malla base amb les cares externes de les geometries. Si les cares de diferents geometries son coincidents i aquestes interfereixen amb la malla base (Base Mesh), al mellar s'originaran tantes superfícies diferents com geometries amb cares coincidents hi ha. Aquest numero de superfícies serà el numero de condicions de contorn diferents que podrem establir. Un exemple seria si es vol introduir dos condicions de contorn (una entrada i una sortida) en el l'hexaedre de la Figura 4.15. Per a fer això es necessiten dos superfícies. Per crear aquests dos superfícies es poden afegir dos hexaedres dintre de l'hexaedre fent coincidir la cara més externa d'aquests amb una de les cares de l'hexaedre més gran, tal com mostra la Figura 4.16. D'aquesta forma es tindran dos superfícies rectangulars que faran de Outlet i Inlet.

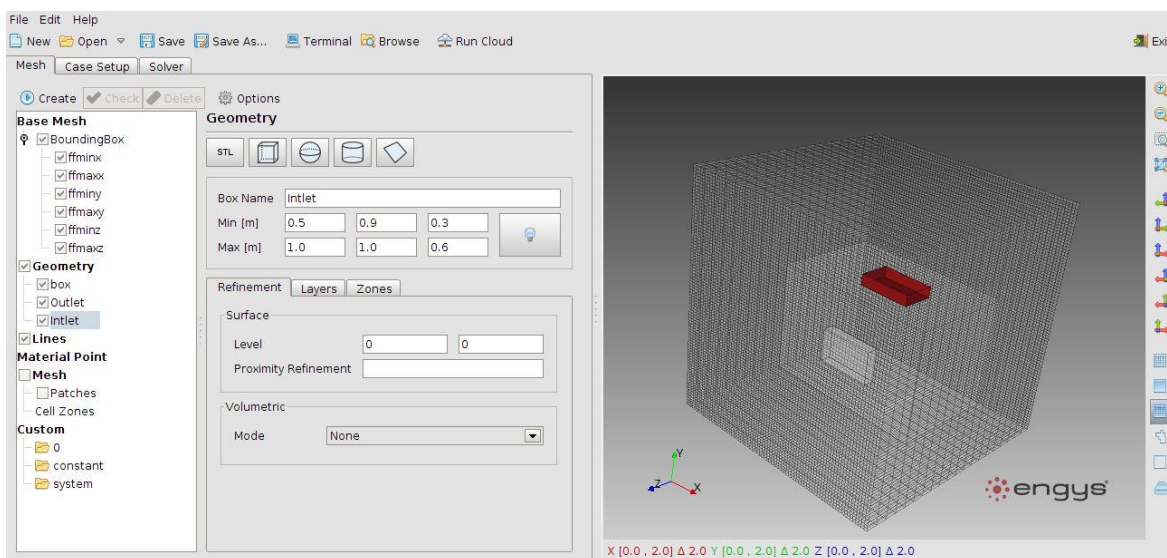


Figura 4.16. Metodologia per generar dos superfícies que faran de condició de contorn Inlet i Outlet.

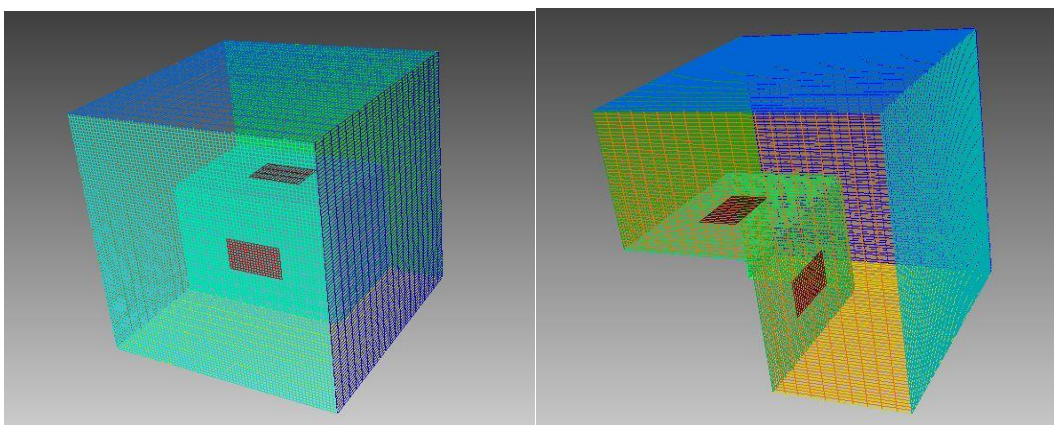


Figura 4.17. Malla generada amb blockMesh de la zona externa a la geometria amb les superfícies (Patch) Intel i Outlet en vermell.

Per a cada geometria es pot definir:

1. Tres tipus de refinament:

Surface: Donat un Level màxim i un Level mínim (per millors resultats es recomana utilitzar com a Level màxim i mínim el mateix), genera un refinament a la zona superficial de la geometria. En les zones més properes a la geometria aplica el Level més gran (la mida de cel·la més petita) i a mida que s'allunya de la geometria aplica un Level més reduït fins arribar a 0 de forma gradual. En la Figura 4.18 es mostra un refinament superficial al voltant de la geometria box de Level màxim i mínim 2.

Com a recordatori, el Level indica el grau de refinament de la cel·les de la malla base (Base Mesh). Un Level de 1, per exemple, significa que dividim les arestes de les cel·les per 2^1 , per un Level de 2 es divideix per 2^2 i per un Level n es divideix per 2^n .

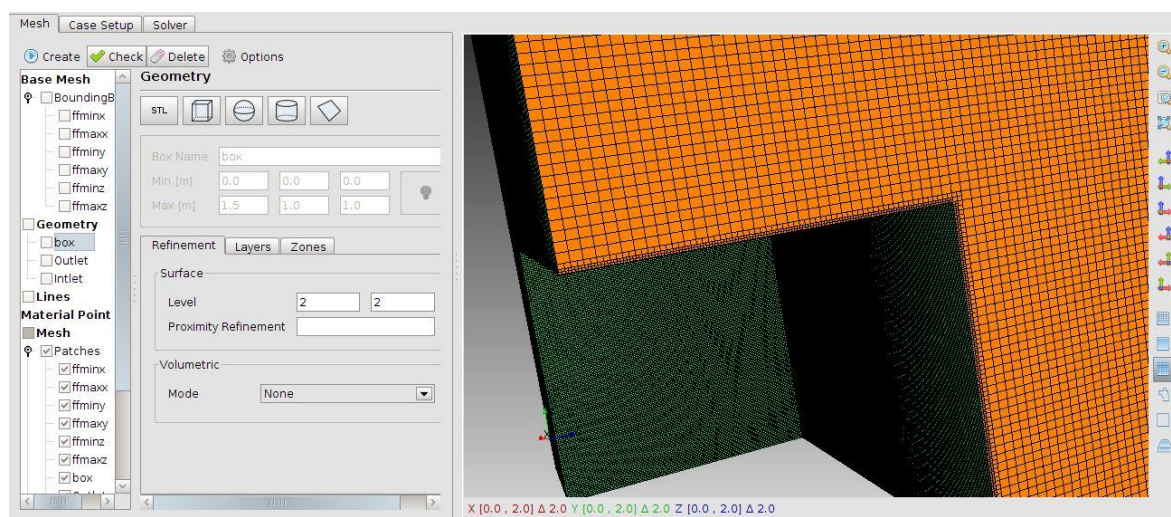


Figura 4.18. Refinament amb Surface Refinement de Level màxim i mínim 2 al voltat de la Geometry box.

Volumetric: Es tenen tres modes de refinaments volumètrics; Inside, Outside i Distance. En els dos primer s'ha de definir només el Level de refinament (el primer mode refinarà tota la zona interna a la geometria i el segon tota la zona externa). Aquests dos modes són molt lents calculant ja que refinen tot el mallat, es per això que es recomana el mode Distance en el qual es pot controlar fins a quina distancia es vol refinar. En la Figura 4.19. es mostra un refinament Volumetric en mode Outside de Level 1. S'observa que la part interna de la geometria queda mallada amb la mida de cel·la original i la part exterior té una mida de cel·la 2^1 vegades menor. En aquest mode de refinament s'entén la geometria com a part de la

mallat també, dit en altres paraules, la geometria no es buida després del mallat tot i que el Material Point estigui a l'exterior d'aquesta.

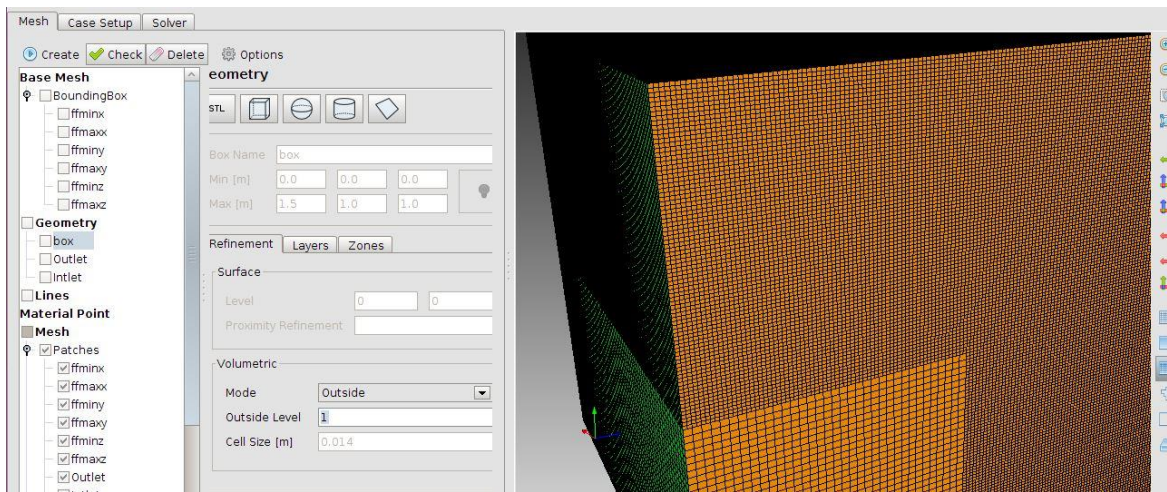


Figura 4.19. Refinament amb Volumetric Refinement Mode Outside de Level 1 al voltant de la Geometry box.

El tercer mode és el Distance. En aquest mode es defineix el Level i la Distance. S'indica quin grau de refinament es vol i fins a quina distancia respecte de la geometria. Es poden fer diferents nivells de refinament fins a diferents distàncies, aquestes han d'estar ordenades de menor a major distancia i de menor a major mida de cel·la (de major a menor Level). En la Figura 4.20 es té un exemple.

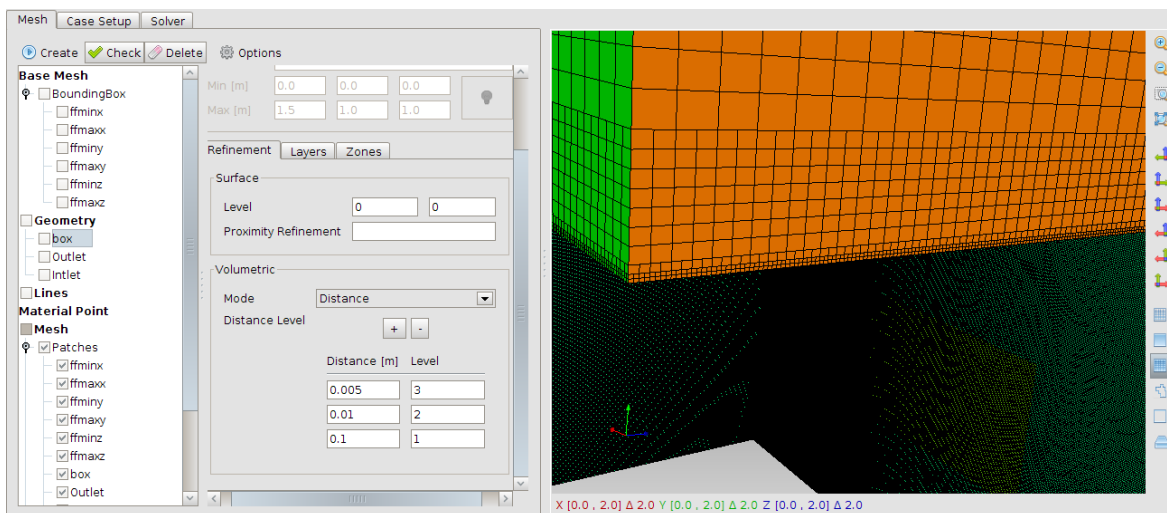


Figura 4.20. Refinament amb Volumetric Refinement Mode Distance de Level 3, 2 i 1 fins a 0.005, 0.01 i 0.1 m, respectivament, de la Geometry box.

Layers: Serveix per refinar les superfícies que envolten una geometria i que seran utilitzades com a condició de contorn. El que es fa és afegir un numero de capes de gruix controlat al voltat d'aquesta superfície. Per aquest tipus de refinament es procedeix de la mateixa manera que es mostra en la Figura 4.14 seleccionant una de les geometries en l'apartat Geometry.

2. La funció de la geometria dintre del camp de treball:

Zones: Serveix per introduir un altre medi (Cell Zone) dintre del camp de treball. Per exemple, si es vol introduir un cos en moviment, una font generadora de calor o un medi porós dintre del camp de treball, es pot definir en aquest apartat. En la interfície s'ha de seleccionar la geometria que es convertirà en una Cell Zone. Hi ha tres tipus de Zones; Internal, Boundary y Baffle. Els dos darrers mantenen la superfície (la qual pot ser utilitzada per establir-hi una condició de contorn) de la geometria al mateix temps que creen la Cell Zone. El primer només crea la Cell Zone. Seleccionant la geometria box, triant el tipus Baffle, activant la creació de la Cell Zone i posant Level màxim i mínim a 0, s'obté el resultat mostrat en la Figura 4.21.

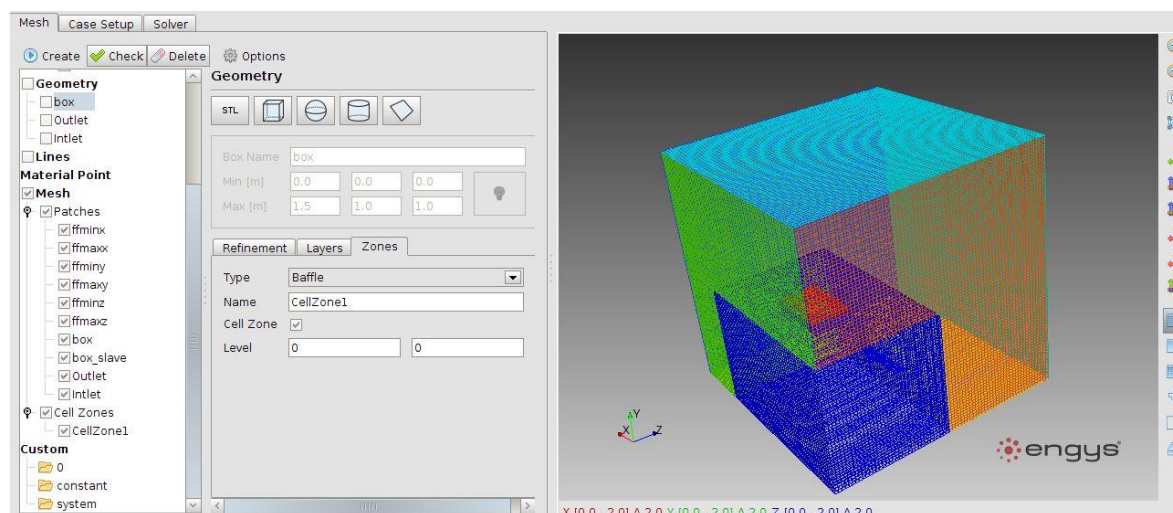


Figura 4.21. Malla on es poden observar dos medis diferents; la malla i la Cell Zone (de color blau) creada a partir de la geometria box.

Lines

Aquest opció refina les zones properes a una línia d'una manera semblant al refinament Volumetric. Donat un Level de refinament i una distancia fins a la qual es vol aplicar aquest grau de refinament. Igual que en el cas Volumetric es poden definir diferents graus de refinament a diferents distancies (sempre ordenat de menor a major distancia). Per obtenir les línies, es poden utilitzar les arestes de

les geometries que es tenen definides a l'apartat Geometry (per exemple les 12 arestes d'un hexaedre). Per obtenir-les s'ha de clicar amb el boto dret del ratolí sobre la geometria en l'apartat Geometry i seleccionar la opci Lines>Extract. Un cop extretes de la geometria original es pot procedir al refinament. La geometria original pot ser eliminada si no es té la intenció d'utilitzar-la en el mallat. En la Figura 4.22 es té un refinament al voltant de les línies box_line (les artistes extretes de la geometria box) de Level 2 i 1 a 0.01 i 0.1 m de distancia, respectivament.

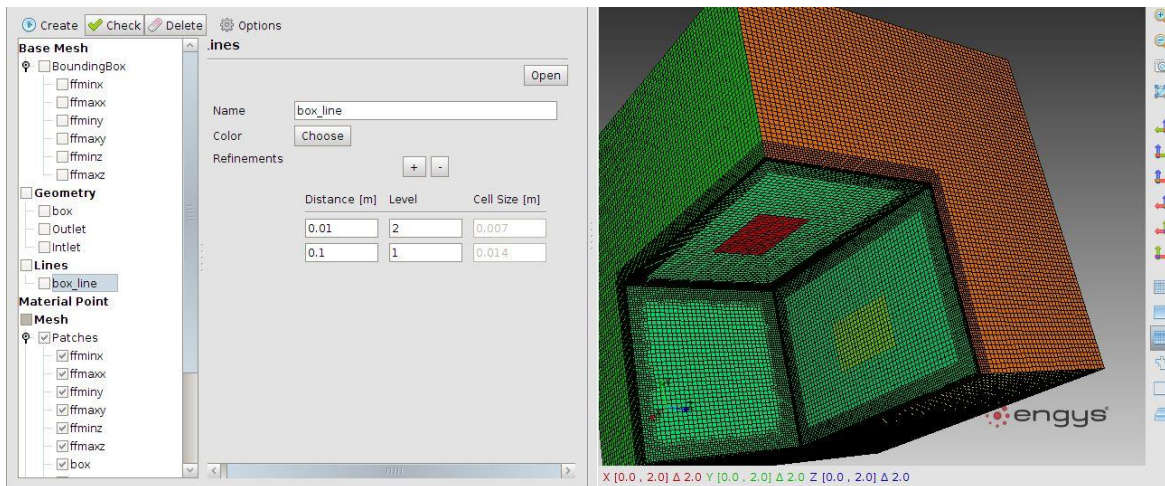


Figura 4.22. Refinament de les arestes de la geometria box.

Material Point

És un sol punt de l'espai que serveix per indicar quina part del camp de treball (geometries + malla base) es vol mallar i aplicar els refinaments. Els refinaments indicats en l'apartat Geometry seran exterior a la geometria si el punt material (Material Point) es troba a l'exterior de la d'aquesta i seran refinaments interiors si aquest punt es troba a l'interior. En la Figura 4.8 es té un exemple on el mallat és exterior a la geometria.

Options

Al seleccionar el botó Option de la interfície apareixen diferents paràmetres que poden ser ajustats per l'usuari. Hi ha paràmetres relacionats amb la qualitat de la malla, toleràncies pel càlcul de la malla, nombre màxim de cel·les permeses pel mallat automàtic, entre d'altres.

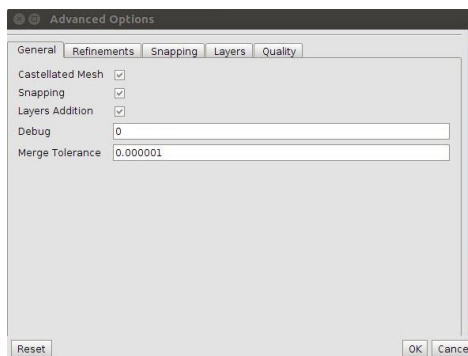


Figura 4.23. Finestra Options de la interfície HelyxOS.

Creació i revisió de la malla

Un cop s'ha definit la malla amb la interfície, aquesta omple amb les dades indicades per l'usuari els arxius d'OpenFOAM.

Per executar els arxius referents a la creació de la malla s'ha de fer clic sobre el boto Create per generar la malla. El temps de càlcul dependrà de la complexitat de les geometries utilitzades i del numero de cel·les. Amb aquest botó s'executen els arxius d'OpenFOAM blockMesh i snappyHexMesh, el primer per crear la malla base i el segon pel refinament i/o manipulació.

Un cop creada la malla, amb el botó Check es pot fer una revisió de la qualitat de la malla. Aquest boto executa l'arxiu checkMesh d'OpenFOAM. Un paràmetre molt important a la hora de revisar una malla és el Mesh non-orthogonality. No es recomana utilitzar malles amb un Mesh non-orthogonality màxim major que 90.

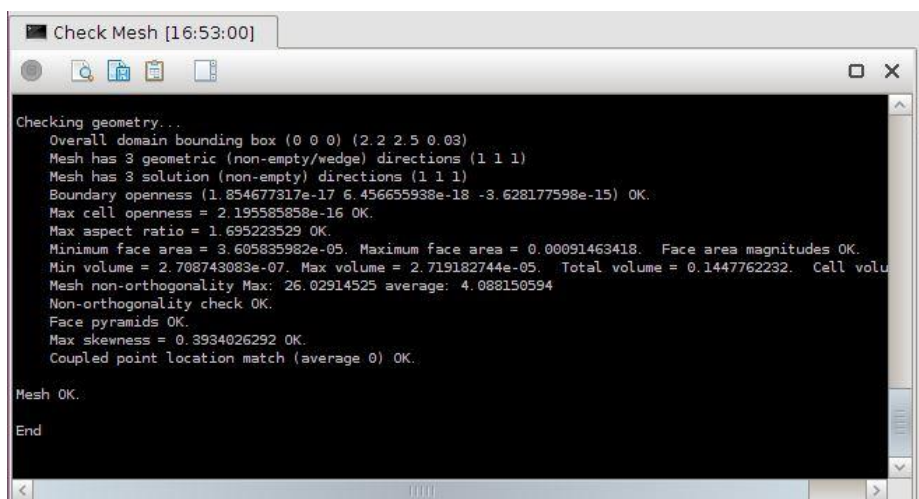


Figura 4.24. Resultat de la revisió de la malla on s'indica que tot està bé; Mesh OK.

5. Estudi amb CFD d'un centre de processament de dades (CPD)

5.1. Identificació del problema

5.1.1. Descripció de la problemàtica a resoldre

Aquest treball té l'objectiu d'estudiar la dinàmica i l'evolució de la temperatura de l'aire dintre d'un CPD, en particular una BTS. L'evolvent de la BTS a estudiar té una mida de $2.2 \times 2.5 \times 2.5 \text{ m}^3$ i està fabricada de panells *Sandwich* compostos de dos plaques metàl·liques d'1 cm d'espessor amb aïllament entremig de 7 cm de llana mineral. S'assumeixen valors típics de coeficients de transferència per convecció de 9 i $16 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ per l'interior i l'exterior, respectivament.

La distribució dels equips dintre d'una BTS, d'acord amb la numeració realitzada, és la mostrada en la Figura 5.1.

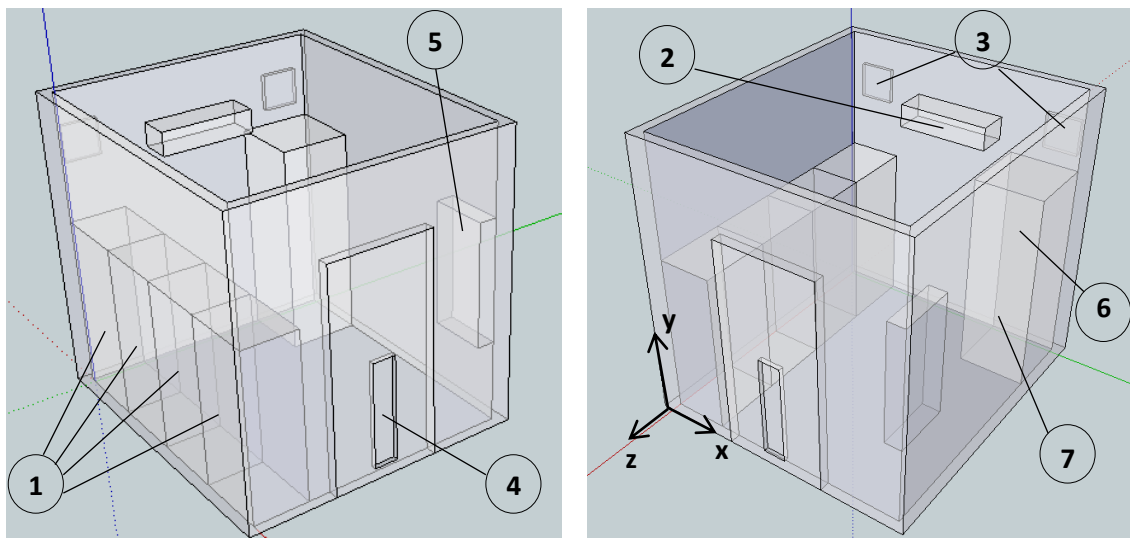


Figura 5.1. La distribució dels equips dintre d'una BTS i el sistema de coordenades utilitzat.

Dintre de la BTS es troben els següents equips:

1. Rack de comunicacions: Cabina metàl·lica amb reixes per la ventilació on s'allotgen els diferents equipaments informàtics i de comunicacions. Consta de 4 entades d'absorció d'aire fresc per a la refrigeració dels components allotjats i 1 sortida d'aire calent.



Figura 5.2. Exemple de Rack de comunicacions (Font: *Product description for RBS 6201*, www.ricosen.com).

2. Equip d'HVAC: Equip de calefacció, ventilació i aire condicionat (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*, HVAC) per a regular el clima de l'estança.
3. Extractors: Ventiladors de velocitat variable segons la temperatura interior de l'estança. Són utilitzats pel mètode de refrigeració *Free Cooling*; s'utilitza l'aire de l'exterior en el procés de refrigeració de l'estança quan aquest té una entalpia inferior a la de l'aire que es vol refredar. Treballen com a extractors d'aire, l'aire fresc entra a l'estança per la reixeta d'entrada col·locada en la porta de l'estança.
4. Reixeta d'entrada: Reixeta per la qual entra l'aire fresc quan es refrigera la BTS mitjançant *Free Cooling*.
5. Quadre elèctric.
6. Equip rectificador.
7. Bateria: Col·locades en el mateix armari que l'equip rectificador.

La configuració a estudiar fent ús de CFD està formada per 4 parets, el terra i un sostre pla amb les dimensions descrites en la Figura 5.3, Figura 5.4 i Figura 5.5.

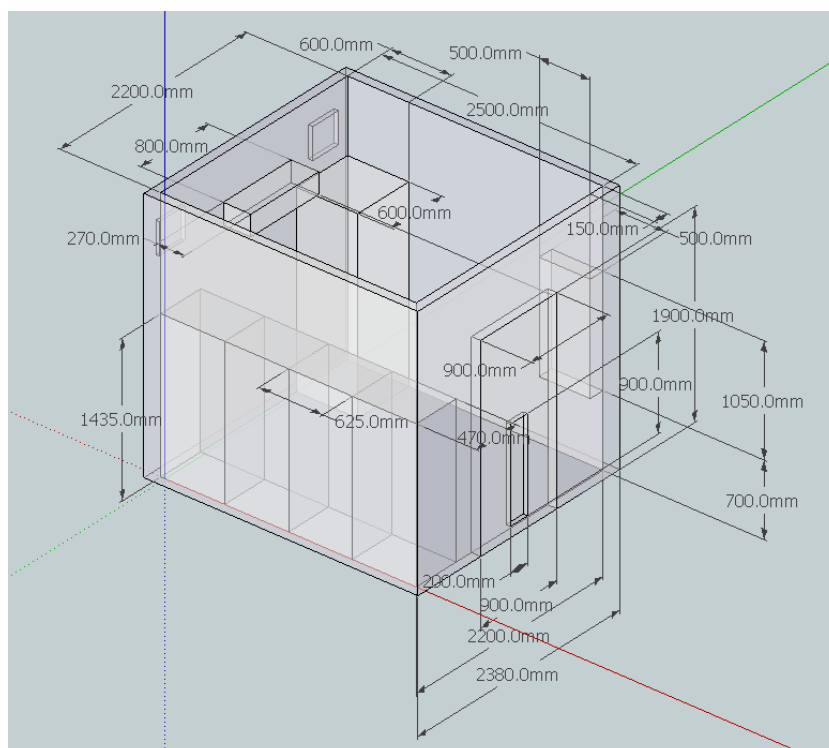


Figura 5.3. Dimensions (A)

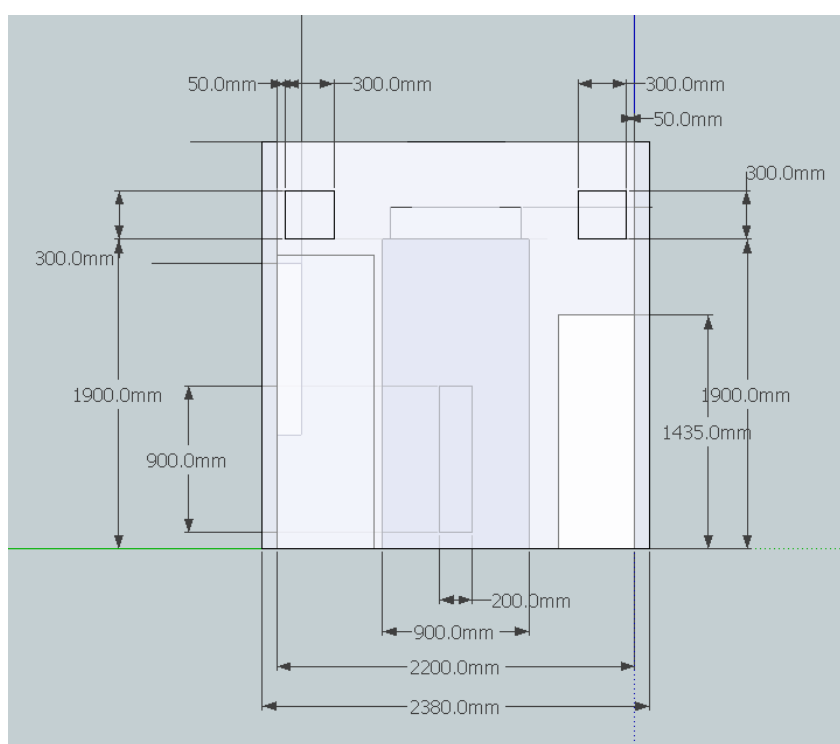


Figura 5.4. Dimensions (B)

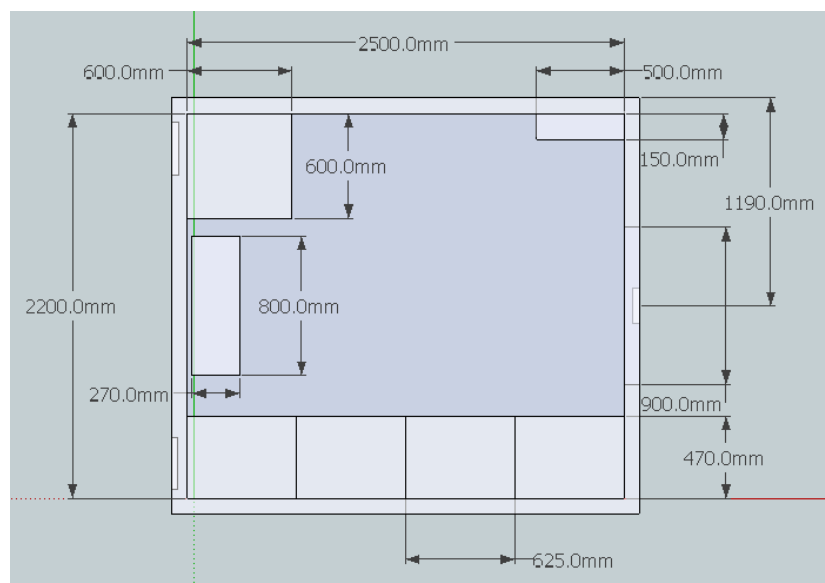


Figura 5.5. Dimensions (C)

5.1.2. Escenaris a analitzar

Cada BTS disposa de 4 Racks, cada un d'ells té un sistema de refrigeració integrat que consisteix en un conjunt de ventiladors interiors que absorbeixen aire de l'estança, i un cop realitzat el cicle de refrigeració a través dels equips informàtics i de comunicacions, l'alliberen de nou a la mateixa estança. Es suposa que cada Rack treballa a un cabal volumètric constant d'aire de $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ i que tota l'energia tèrmica alliberada pels equips en el cicle de refrigeració passa a l'aire. Aquesta energia tèrmica absorbida per l'aire es considera constant i de valor 1.5 kW per cada Rack. Tenint en compte aquestes consideracions s'avaluaran tres escenaris diferents.

Escenari 1. Cap element mecànic està funcionant per refrigerar l'interior de l'estança. En aquesta situació ni l'equip d'HVAC ni els ventiladors estan funcionant. L'aire calent alliberat pels Racks fa incrementar la temperatura de l'estança sense que hi hagi cap sistema que en freni l'augment.

Es consideren les temperatures següents:

Temperatura exterior de l'ambient: 15°C

Temperatura inicial a l'interior de la BTS: 24°C

Temperatura del terra de la BTS: 24°C

Escenari 2. *Free cooling*. Es considera una situació d'hivern en que es pot aprofitar la baixa entalpia de l'ambient per refrigerar l'aire de l'interior de l'estança. Es posen en marxa els dos ventiladors, cada un d'ells funciona com a extractor d'aire a un cabal volumètric constant de $1230 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a través d'una secció de 0.09 m^2 . L'aire fresc a temperatura ambient entra a l'estança a través de la reixeta (de secció útil 0.18 m^2) que es troba en la part inferior de la porta.

Es consideren les temperatures següents:

Temperatura exterior de l'ambient: 15°C

Temperatura inicial a l'interior de la BTS: 26°C

Temperatura del terra de la BTS: 24°C

Escenari 3. Hi ha l'equip d'HVAC funcionant. Es considera una situació d'estiu on el *free cooling* no pot ser utilitzat perquè l'entalpia de l'ambient és superior a la de l'aire a l'interior de l'estança. Es posa a funcionar l'equip d'HVAC a un cabal volumètric d'aire constant de $1680 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a 15°C a través d'una secció útil de 0.126 m^2 .

Es consideren les temperatures següents:

Temperatura exterior de l'ambient: 30°C

Temperatura inicial a l'interior de la BTS: 28°C

Temperatura del terra de la BTS: 24°C

5.1.3. Hipòtesis

Conductivitats tèrmiques

L'evolvent de la BTS està formada per panells *Sandwich* compostos de dos plaques metàl·liques d'1 cm d'espessor amb aïllament entremig de 7 cm de llana mineral. Es considera una conductivitat tèrmica constant de 50 i $0.04 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot ^\circ \text{K}^{-1}$ per a la placa metàl·lica k_{pm} i la llana mineral k_{ll} , respectivament.

Cabal màssic a través dels Racks

Tot i considerar un cabal volumètric constant de $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ d'aire de refrigeració per cada Rack, el cabal màssic no es manté constant ja que degut als canvis de temperatura i pressió (la pressió no

varia significativament) de l'aire, la densitat no es manté constant en l'entrada i sortida del Rack. Tot i això, en aquest treball s'assumirà un petit error i es suposarà un cabal màssic constant calculat a una pressió de 101325 Pa i a la temperatura inicial a l'interior de la BTS. L'error que és comet al suposar que el cabal màssic es manté constant a través del Rack en un increment de temperatura de 25 a 35 °C és del 3.25 % ja que el cabal màssic passa de 0.3951 a 0.3823 kg·s⁻¹. Com es pot deduir aquest error és més petit com més petit és l'increment de temperatura (per exemple, de 25 a 35 °C es comet un error del 1.65 %).

Seccions d'entrada i sortida d'aire en els Racks

En la Figura 5.6 es marquen de color vermell els equips incorporats en el Rack que disposen de ventiladors per aspirar aire fresc de l'estança. L'aire, un cop realitzat el cicle de refrigeració, és expulsat per la base superior del Rack.

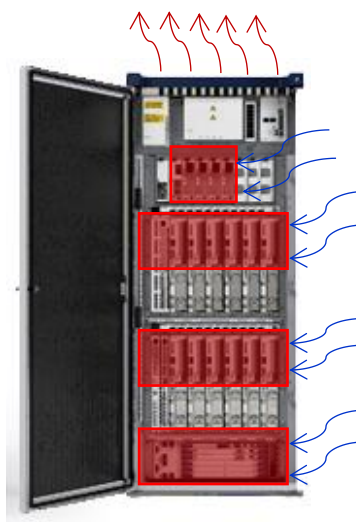


Figura 5.6. De color vermell es marquen les zones d'aspiració d'aire del Rack. Les fletxes blaves simbolitzen l'aire fresc que entre i les fletxes vermelles l'aire calent que surt per la base superior.

El Rack disposa d'una porta enreixada per on entre l'aire aspirat pels ventiladors, l'aire calent surt per la base superior a través d'una reixa també. Per a la realització de la simulació en CFD es suposaran 4 entrades d'aire de 200x600 mm² repartides de forma homogènia al llarg de la porta enreixada i una sortida d'aire de 300x600 mm² en la base superior del Rack.

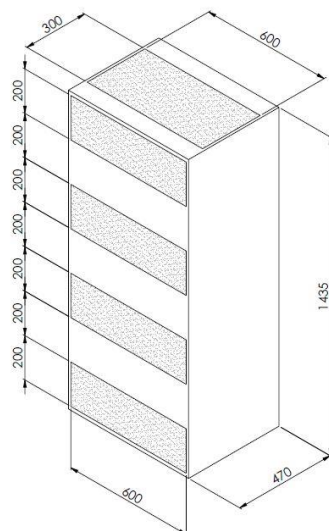


Figura 5.7. Simplificació de les 4 entrades i la sortida d'aire del el Rack.

5.1.4. Càlculs previs a la simulació

Escenari 1

- Flux d'aire a través dels Racks

En l'escenari 1 es considera una temperatura exterior, interior inicial i del terra de 15, 24 i 24 °C, respectivament. S'estableix un volum de control al voltant d'un Rack el qual té 4 entrades d'aire fresc de 200x600 mm² (una secció total de 800x600 mm²) i una sola sortida d'aire calent de 300x600 mm². Es té un cabal total constant de 0.333 m³·s⁻¹ (1200 m³·s⁻¹) a l'entrada del Rack. Sota les condicions d'estudi l'aire es comporta com un gas ideal.

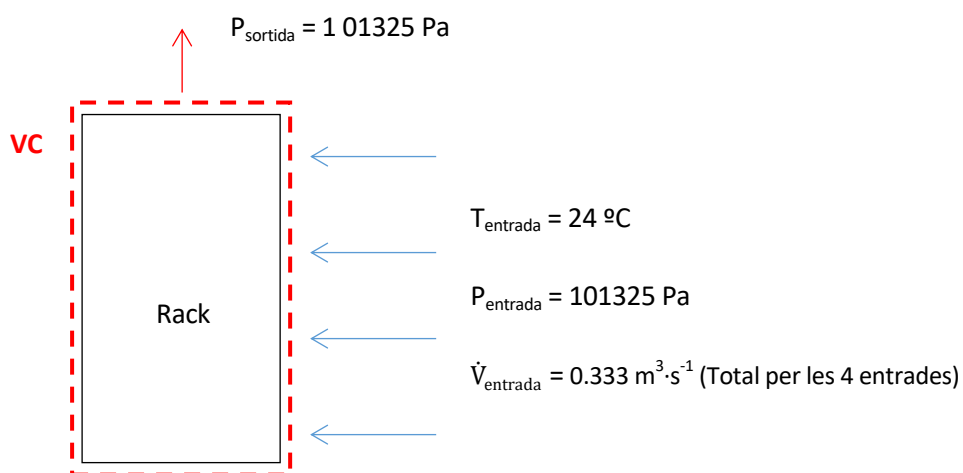


Figura 5.8. Volum de control al voltant del Rack.

Considerant règim estacionari i la conservació de massa en el VC establert, es té que el cabal màssic a l'entrada del volum de control VC és igual al cabal màssic a la sortida.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{sortida} = \rho_{entrada} \dot{V}_{entrada} &= \frac{P_{entrada}}{R' \cdot T_{entrada}} \dot{V}_{entrada} = \frac{101325}{286.69 \cdot (24 + 273.15)} \cdot \frac{1200}{3600} = \\ &= 0.396467 = \mathbf{0.3965 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}\end{aligned}$$

On R' és la constant universal dels gasos ideals dividida per la massa molar del gas. Al tenir 4 entrades, el cabal màssic en cada una de les entrades és de $0.099125 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Per trobar la temperatura a la sortida del Rack s'aplica el primer principi de la termodinàmica per a sistemes oberts en règim estacionari en el volum de control considerat:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{VC} = \sum_k^{n^{\circ} \text{ sortides}} \dot{m}_k \cdot \left(h_k + \frac{c_k^2}{2} + g z_k \right) - \sum_j^{n^{\circ} \text{ entrades}} \dot{m}_j \cdot \left(h_j + \frac{c_j^2}{2} + g z_j \right) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

L'equació Eq. 5.1 Representa un sistema obert amb k sortides i j entrades. On \dot{Q} seria la potencia tèrmica del Rack (taxa de calor absorbida per l'aire al circular per dintre del Rack en el procés de refrigeració), \dot{W}_{VC} el treball realitzat sobre les parets del volum de control, h l'entalpia, c la velocitat mitja de l'aire, z la posició de l'aire i g la constant gravitatòria ($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Sobre el volum de control no es realitza cap treball, per tant $\dot{W}_{VC} = 0$. Al tenir aire l'efecte de l'energia potencial degut a la gravetat es negligible, per tant $g z_j = 0$

Manipulant l'equació anterior i considerant com a entrada la unió de les quatre entrades de $200 \times 600 \text{ mm}^2$, es té:

$$h_{sortida} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{entrada}} + h_{entrada} + \frac{c_{entrada}^2}{2} - \frac{c_{sortida}^2}{2} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Les velocitats a l'entrada i a la sortida es poden definir de la següent manera:

$$\begin{aligned}c_{entrada} &= \frac{\dot{m}_{entrada}}{\rho_{entrada} \cdot Area_{entrada}} = \frac{0.396467}{1.1894 \cdot (0.2 \cdot 0.6 \cdot 4)} = 0.69444 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ c_{sortida} &= \frac{\dot{m}_{sortida}}{\rho_{sortida} \cdot Area_{sortida}} = \frac{0.3978}{\rho_{sortida} \cdot (0.3 \cdot 0.6)} = \frac{2.2026}{\rho_{sortida}}\end{aligned}$$

Tornant a l'equació Eq. 5.2 i utilitzant la taules per a les propietats de l'aire a 1 atm de la referència (2).

$$h_{sortida} = \frac{1500}{0.396467} + 297328,6 + \frac{0.69444^2}{2} - \frac{2.2026^2}{2 \cdot \rho_{sortida}^2}$$

$$h_{sortida} = 301112.26 - \frac{2.4257}{\rho_{sortida}^2}$$

No es pot saber la densitat a la sortida ja que no es disposa de la temperatura. En l'expressió anterior es pot eliminar el terme que conte la densitat. Al tractar-se d'aire, el terme que resta es negligible en comparació amb el terme que suma (de valor 301112.26 J·kg⁻¹).

$$h_{sortida} = 301.11 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

A partir de les taules de la referencia (2) es pot obtenir la temperatura a 1 atm i a una entalpia de 301.1 kJ·kg⁻¹

$$T_{sortida} = 300.92 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$c_{sortida} = \frac{2.2026}{\rho_{sortida}} = \frac{22.2026}{\frac{101325}{286.69 \cdot 300.92}} = \frac{2.2026}{1.174} = 1.87535 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La temperatura de 27.77 °C (300.92 °K) és la temperatura a la que l'aire surt expulsat del Rack després de refrigerar-ne l'interior. Cal tenir en comte que aquesta temperatura no es manté constant ja que la temperatura de l'aire fresc que entra al Rack no es manté constant a 24 °C sinó que pot augmentar o disminuir, depenent de si l'estança s'escalfa o es refreda. Per tant, s'ha de buscar una expressió que relacioni la temperatura de sortida amb la temperatura d'entrada en el Rack per poder establir una condició de contorn variable groovyBC en la simulació.

Un gas ideal compleix la següent relació:

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (\text{Eq. 5.3})$$

En la taula TABLA A-9 de la referencia 14, s'observa que el calor específic c_p es manté constant a un valor de 1007 J·kg⁻¹·K⁻¹ entre els 15 i els 70 °C. En el rang de temperatures en les quals es treballa en aquest treball es pot acceptar la següent simplificació per a la diferencia d'entalpies entre la sortida i l'entrada del Rack:

$$\Delta h = c_p \Delta T = 1007 \cdot (T_{sortida} - T_{entrada})$$

$$h_{sortida} - h_{entrada} = c_p \Delta T = 1007 \cdot (T_{sortida} - T_{entrada})$$

Tornat a l'equació Eq. 5.2 es tindria el següent:

$$1007 \cdot (T_{sortida} - T_{entrada}) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{entrada}} + \frac{c_{entrada}^2}{2} - \frac{c_{sortida}^2}{2}$$

Fent la hipòtesi de que el cabal màssic es manté constant i negligint els termes que depenen de la velocitat:

$$T_{sortida} = \frac{1500}{0.396467 \cdot 1007} + T_{entrada} = 3.76 + T_{entrada}$$

Com s'ha comentat el domini de treball és l'estança, per tant la sortida del Rack correspon a una entrada en el domini de treball. Si es treballa amb un dels models de turbulència k-ε a l'entrada del domini de treball s'ha d'especificar el valor de k (energia cinètica turbulenta) i ε (dissipació de l'energia cinètica turbulenta) en aquesta entrada. Si es treballa amb el model Spalart Allmaras s'ha d'especificar la viscositat cinemàtica turbulenta ν_t . Segons la pagina U-45 de la guia *OpenFOAM User Guide version 4.0* (1), aquests tres paràmetres es poden calcular de la següent manera:

$$k = 1.5(T_i \cdot U_{ref})^2 \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$\epsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

$$\nu_t = \sqrt{\frac{3}{2}} (U_{ref} \cdot T_i \cdot l) \quad (\text{Eq. 5.6})$$

On U_{ref} és la velocitat de referència, T_i la intensitat de turbulència de valor 5% per a problemes de turbulència baixa ($<10^6$), l és una escala de longitud turbulenta de valor igual al 5% d'una longitud característica del domini L_{car} i C_μ és una constant de valor 0.09. A l'entrada es té $U_{ref} = 1.87535 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i una longitud característica L de 0.6 mm.

A 27.77 °C es té que $\rho = 1.173 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ i $\mu = 1.8617 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (14, *Tabla A-9. Propiedades del Aire a 1 atm*). Per tant:

$$Re = \frac{\rho U_{ref} L_{car}}{\mu} = \frac{1.173 \cdot 1.87535 \cdot 0.6}{0.000018617} = 70896$$

$$k = 1.5 \cdot (1.87535 \cdot 0.05)^2 = 0.01319 \cong 0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\epsilon = 0.09^{\frac{3}{4}} \frac{(0.01319)^{\frac{3}{2}}}{0.05 \cdot 0.6} = 0.0083 \cong 0.008 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$v_t = \sqrt{\frac{3}{2}} (1.87535 \cdot 0.05 \cdot 0.05 \cdot 0.6) = 0.0034 \cong \mathbf{0.003 \, m^2 \cdot s^{-1}}$$

- Flux de calor a través de les parets de l'estança

Els panells utilitzats estan formats per dos plaques metàl·liques ($k_{pm} = 50 \, \text{W} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$) d'1 cm d'espessor amb aïllament entremig de 7 cm de llana mineral ($k_{ll} = 0.04 \, \text{W} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$). També s'ha de tenir en compte la transferència de calor per convecció, assumint valors típics de coeficients de transferència per convecció de 9 i $16 \, \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ per l'interior h_i i l'exterior de l'estança h_e , respectivament.

Per calcular la resistència tèrmica d'un panell Sandwich es farà un associació en sèrie de resistències tèrmiques sabent que la temperatura exterior de l'ambient és de $15 \, ^\circ\text{C}$ i l'interior inicial és de $24 \, ^\circ\text{C}$.

$$R_T = \frac{1}{A_i \cdot h_i} + \frac{e_{pm}}{A_{pm} \cdot k_{pm}} + \frac{e_{ll}}{A_{ll} \cdot k_{ll}} + \frac{e_{pm}}{A_{pm} \cdot k_{pm}} + \frac{1}{A_e \cdot h_e} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

$$\dot{Q}_{\text{paret}} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

e fa referència al l'espessor de cada un dels components de la paret. A_i , A_{pm} , A_{ll} i A_e fan referència a cada una de les àrees de cada component de la paret pel qual circula el flux de calor. En aquest problema l'àrea es manté constant al llarg de tot el gruix de la paret $A_i = A_{pm} = A_{ll} = A_e = A$:

$$A \cdot R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{e_{pm}}{k_{pm}} + \frac{e_{ll}}{k_{ll}} + \frac{e_{pm}}{k_{pm}} + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{9} + \frac{0.01}{50} + \frac{0.07}{0.04} + \frac{0.01}{50} + \frac{1}{16} = 1.9240 \, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\dot{Q}_{\text{paret}} = \frac{\Delta T}{R_T} \rightarrow \dot{q}_{\text{paret}} = \frac{\Delta T}{A \cdot R_T} = \frac{24 - 15}{1.9240} = \mathbf{4.6778 \, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

El conveni de signes en OpenFOAM defineix el flux de calor que surt del domini com a negatiu.

$$\dot{q}_{\text{paret}} = \mathbf{-4.6778 \, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

- Resum

Temperatura inicial a la sortida del Rack ($^\circ\text{K}$)	300.92
Expressió per la temperatura inicial a la sortida del Rack en funció de la temperatura d'entrada ($^\circ\text{K}$)	$T_{\text{sortida}} = 3.76 + T_{\text{entrada}}$

Cabal màssic a la sortida del Rack ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.3965
Cabal màssic a cada entrada del Rack ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	-0.099125
Velocitat a la sortida del Rack ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.87535
Energia cinètica turbulenta k a la sortida del Rack a la sortida del Rack ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)	0.01
Dissipació de l'energia cinètica turbulenta ε a la sortida del Rack ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$)	0.008
Viscositat cinemàtica turbulenta ν_t a la sortida del Rack ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0.003
Flux de calor a les parets de l'estança ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	-4.6778

Taula 5.1 Resum de resultats per la simulació de l'escenari 1

Escenari 2

- Flux d'aire a través dels Racks

Es procedeix de la mateixa forma que en l'escenari 1 tenint en compte que la temperatura exterior, interior inicial i del terra és 15, 26 i 24 °C, respectivament.

- Flux de calor a través de les parets de l'estança

Es procedeix de la mateixa forma que en l'escenari 1 però en aquest cas la diferència de temperatures entre l'exterior i l'interior de l'estança és:

$$\Delta T = 26 - 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Flux d'aire a través dels extractors d'aire i la reixeta de la porta

En l'escenari 2 es considera una temperatura exterior, interior inicial i del terra de 15, 26 i 24 °C, respectivament i el mètode de climatització *free cooling*. L'estança consta de dos extractors d'aire, cada un d'ells està accionat per un ventilador i treballa a un cabal volumètric constant de $1230 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ a través d'una secció de 0.09 m^2 .

Considerant que els extractors aspiren aire a 26 °C i 101325 Pa, es té el següent cabal màssic:

$$\dot{m}_{\text{extractor}} = \frac{P_{\text{interior}}}{R' \cdot T_{\text{interior}}} \dot{V}_{\text{extractor}} = \frac{101325}{286.69 \cdot (26 + 273.15)} \cdot \frac{1230}{3600} = \mathbf{0.4037 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

L'aire que surt pels dos extractors és considerat el mateix que entra per la reixeta d'entrada que es troba en la part inferior de la porta.

$$\dot{m}_{reixeta} = 2 \cdot \dot{m}_{extractor} = 2 \cdot 0.4037 = \mathbf{0.8074 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

La reixeta té una superfície útil de 0.18 m^2 i l'aire entra a l'estaça a 15°C i 101325 Pa . Després la velocitat de l'aire serà:

$$c_{reixeta} = \frac{\dot{m}_{reixeta}}{\rho_{exterior} \cdot Area_{reixeta}} = \frac{0.8074}{\frac{101325}{286.69 \cdot (15 + 273.15)} \cdot 0.18} = \mathbf{3.65670 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

La reixeta d'entrada és una entrada d'aire al domini de treball per tant s'haurà d'especificat k i ε o v_t si es vol utilitzar el model de turbulència k - ε o Spalart Allmaras., respectivament A l'entrada es té $U_{ref} = 3.65670 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i una longitud característica de 0.9 m .

A 15°C es té que $\rho = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ i $\mu = 1.8020 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (14, *Tabla A-9. Propiedades del Aire a 1 atm*). Per tant:

$$Re = \frac{\rho U_{ref} L_{car}}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 3.6567 \cdot 0.9}{0.00001802} = \mathbf{223724.29}$$

$$k = 1.5 \cdot (3.6567 \cdot 0.05)^2 = 0.050143 \cong \mathbf{0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}$$

$$\varepsilon = 0.094 \frac{(0.050143)^{\frac{3}{2}}}{0.05 \cdot 0.9} = 0.04100 \cong \mathbf{0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}}$$

$$v_t = \sqrt{\frac{3}{2} (3.6567 \cdot 0.05 \cdot 0.05 \cdot 0.9)} = 0.010077 \cong \mathbf{0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}$$

- Resum

Temperatura inicial a la sortida del Rack ($^\circ\text{K}$)	302.94
Expressió per la temperatura inicial a la sortida del Rack en funció de la temperatura d'entrada ($^\circ\text{K}$)	$T_{sortida} = 3.78 + T_{entrada}$
Cabal màssic a la sortida del Rack ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.3938
Cabal màssic a cada entrada del Rack ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.09845
Velocitat a la sortida del Rack ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.87531
Energia cinètica turbulenta k a la sortida del Rack a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	0.01

Dissipació de l'energia cinètica turbulenta ϵ a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	0.008
Viscositat cinemàtica turbulenta ν_t a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.003
Flux de calor a les parets de l'estança ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	-5.7172
Cabal màssic d'aire en l'extractor d'aire ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.4037
Cabal màssic d'aire en la reixeta ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.8074
Velocitat de l'aire en la reixeta ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.6567
Energia cinètica turbulenta k a la reixeta ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	0.05
Dissipació de l'energia cinètica turbulenta ϵ a la reixeta ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	0.04
Viscositat cinemàtica turbulenta ν_t a la reixeta ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.01

Taula 5.2 Resum de resultats per la simulació de l'escenari 2

Escenari 3

- Flux d'aire a través dels Racks

Es procedeix de la mateixa forma que en l'escenari 1 tenint en compte que la temperatura exterior, interior inicial i del terra és 30, 28 i 24 °C, respectivament.

- Flux de calor a través de les parets de l'estança

Es procedeix de la mateixa forma que en l'escenari 1 però en aquest cas la diferència de temperatures entre l'exterior i l'interior de l'estança és:

$$\Delta T = 28 - 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Flux d'aire impulsat per l'equip d'HVAC

L'equip impulsa aire a 15 °C i 101325 Pa a un cabal volumètric constant de $1680 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\dot{m}_{HVAC} = \frac{P_{interior}}{R' \cdot T_{impulsió}} \dot{V}_{HVAC} = \frac{101325}{286.69 \cdot 288.15} \cdot \frac{1680}{3600} = 1.225 \cdot 0.4667 = \mathbf{0.5724 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Es considera que impulsa el mateix cabal màssic d'aire que aspira de l'estança i que les seccions d'aspiració i impulsó tenen la mateixa secció de 0.126 m^2 .

$$C_{reixeta} = \frac{\dot{m}_{reixeta}}{\rho_{interior} \cdot Area_{reixeta}} = \frac{0.5724}{\frac{101325}{286.69 \cdot 288.15} \cdot 0.126} = 3.7038 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La impulsió d'aire de l'equip d'HVAC és una entrada d'aire al domini de treball per tant s'haurà d'especificar k i ϵ o ν_t si es vol utilitzar el model de turbulència k - ϵ o Spalart Allmaras, respectivament. A l'entrada es té $U_{ref} = 3.7038 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i una longitud característica de 0.76 m.

A 15 °C es té que $\rho = 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ i $\mu = 1.8020 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (14, *Tabla A-9. Propiedades del Aire a 1 atm*). Per tant:

$$Re = \frac{\rho U_{ref} L_{car}}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 3.7038 \cdot 0.76}{0.00001802} = 191356.15$$

$$k = 1.5 \cdot (3.7038 \cdot 0.05)^2 = 0.05144 \cong 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\epsilon = 0.09 \frac{3}{4} \frac{(0.05144)^{\frac{3}{2}}}{0.05 \cdot 0.76} = 0.05045 \cong 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$\nu_t = \sqrt{\frac{3}{2}} (3.7038 \cdot 0.05 \cdot 0.05 \cdot 0.76) = 0.00862 \cong 0.009 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Resum

Temperatura inicial a la sortida del Rack (°K)	305.31
Expressió per la temperatura inicial a la sortida del Rack en funció de la temperatura d'entrada (°K)	$T_{sortida} = 3.81 + T_{entrada}$
Cabal màssic a la sortida del Rack ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.3912
Cabal màssic a cada entrada del Rack ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.0978
Velocitat a la sortida del Rack ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.87743
Energia cinètica turbulenta k a la sortida del Rack a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	0.01
Dissipació de l'energia cinètica turbulenta ϵ a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	0.008
Viscositat cinemàtica turbulenta ν_t a la sortida del Rack ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.003
Flux de calor a les parets de l'estança ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.0395
Cabal màssic d'aire impulsat per l'equip d'HVAC ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.5724
Cabal màssic d'aire aspirat per l'equip d'HVAC ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	-0.5724

Velocitat de l'aire impulsat per l'equip d'HVAC ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.7038
Energia cinètica turbulenta k de l'aire impulsat per l'equip d'HVAC ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)	0.05
Dissipació de l'energia cinètica turbulenta ε de l'aire impulsat per l'equip d'HVAC ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$)	0.05
Viscositat cinemàtica turbulenta ν_t de l'aire impulsat per l'equip d'HVAC ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0.009

Taula 5.3 Resum de resultats per la simulació de l'escenari 3

5.1.5. Mallat

El mallat és la part més important d'un procés de simulació en CFD. S'ha de garantir una bona malla per obtenir uns bons resultats. El domini de treball a estudiar és relativament gran; l'interior de la BTS té una mida de $2.2 \times 2.5 \times 2.5 \text{ m}^3$ i les velocitats que es poden assolir en les zones properes a la paret són també elevades fent que el nombre de cel·les necessàries per el domini sigui gran. En l'escenari 3, per exemple, la zona d'aspiració de l'HVAC es troba molt a prop de la paret i aspira aire a una velocitat de 3.7 m/s . Aquesta velocitat farà necessari un refinament important en les parets properes a la zona d'aspiració de l'HVAC.

En aquest treball s'han provat inicialment malles amb un y^+ en les zones properes a la paret de 140, 100, 80 y 30. El millor equilibri entre temps de càlcul i qualitat de resultats s'obté en la malla amb y^+ 80 i increment de malla gradual al allunyar-se de la paret.

Amb les propietats de l'aire, la velocitat del fluid, una longitud de referencia i el y^+ desitjat es pot calcular la mida de l'aresta de la primera cel·la adjacent a la paret a partir de l'aplicació que es troba a <http://www.pointwise.com/yplus/> basada en la teoria de capa límit per una placa plana de *Frank M. White's Fluid Mechanics 5th Edition*, page 467.

Primerament es crea una malla base utilitzant blockMesh amb una mida de cel·la de $0.055 \times 0.055 \times 0.055 \text{ m}^3$. Al tenir diferents condicions de flux per cada un dels escenaris, es fan tres tipus de refinament diferents amb snappyHexMesh. Per el refinament amb snappyHexMesh s'utilitza el paràmetre Level introduït en l'apartat 4.2.3 d'aquest treball.

En l'Annex A.1 es troben imatges de les malles utilitzades per a cada un dels escenaris.

Escenari 1

Les primeres simulacions d'aquest model mostraven que el sostre de l'estança és la zona on els gradients són més important i on les primeres simulacions fallaven numèricament al cap d'alguns segons. Es decideix mollar aquesta zona amb un mínim de 10 cel·les amb un y^+ de 50 calculat a una

velocitat de $1.875 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (equivalent a una mida de cel·la de $6.875 \times 6.875 \times 6.875 \text{ mm}^3$). La resta de parets es mallen amb un mínim de 10 cel·les amb un y^+ de 80 (equivalent a una mida de cel·la de $13.75 \times 13.75 \times 13.75 \text{ mm}^3$), incloent la paret propera a la sortida d'aire dels Racks on s'origina la velocitat màxima en l'instant 0 de simulació ($1.875 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La malla resultant consta de 3513164 cel·les.

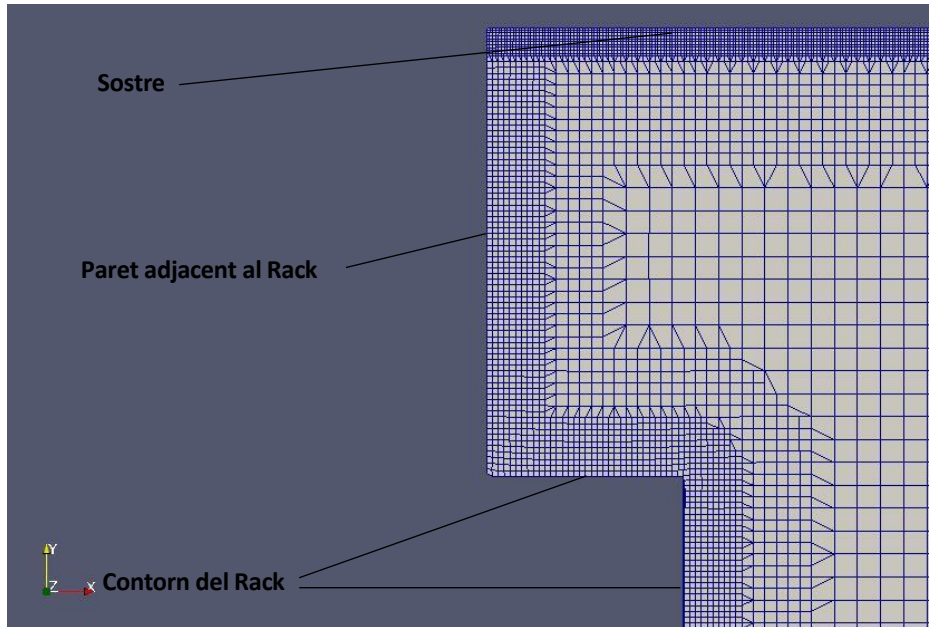


Figura 5.9. Malla a un pla col·locat paral·lelament a 1.25 m de la porta de l'estança. S'observa un refinament amb un y^+ de 80 en les parets i contorn del Rack mentre que en el sostre es té un y^+ de 50.

Escenari 2

La velocitat màxima en l'instant 0 és de $3.657 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i es produeix en els extractors i la reixeta de la porta per on surt i entra l'aire, respectivament, en el *free cooling*. S'introdueixen un mínim de 10 cel·les amb un y^+ de 80 (equivalent a una mida de cel·la de $6.875 \times 6.875 \times 6.875 \text{ mm}^3$) en les parets adjacents a aquestes entrades i sortides d'aire i en les altres parets s'aplica un y^+ de 140 (equivalent a una mida de cel·la de $13.75 \times 13.75 \times 13.75 \text{ mm}^3$). La malla resultant consta de 3358825 cel·les.

Escenari 3

La velocitat màxima en l'instant 0 és de $3.704 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i es produeix en la impulsió i l'absorció de l'equip d'HVAC. S'introdueixen un mínim de 10 cel·les amb un y^+ de 80 (equivalent a una mida de cel·la de $6.875 \times 6.875 \times 6.875 \text{ mm}^3$) en la paret que suporta l'equip d'HVAC i el sostre de l'estança. En la resta de parets s'aplica un y^+ de 140 (equivalent a una mida de cel·la de $13.75 \times 13.75 \times 13.75 \text{ mm}^3$). Degut a que s'han trobat errors numèrics en l'aspiració de l'equip d'HVAC, també es refina aquesta zona amb un y^+ de 80. La malla resultant consta de 3560372 cel·les.

5.1.6. Condicions de contorn

A continuació es fa un desglossament de les condicions de contorn utilitzades per a la simulació de cada un dels escenaris. En la Figura 5.10 i 5.11 es mostra el domini de treball amb els diferents contorn que el componen.

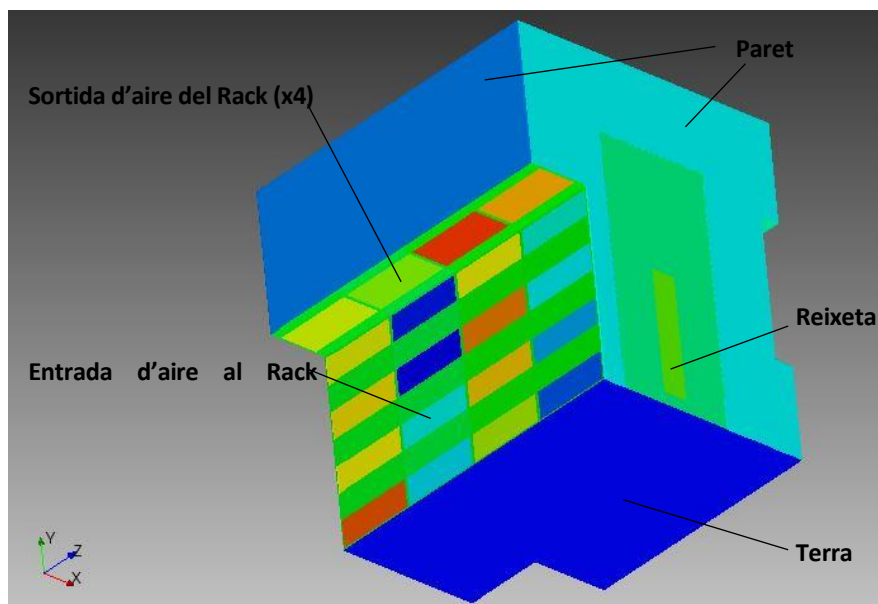


Figura 5.10. Domini a simular amb la denominació dels diferents contorns (A).

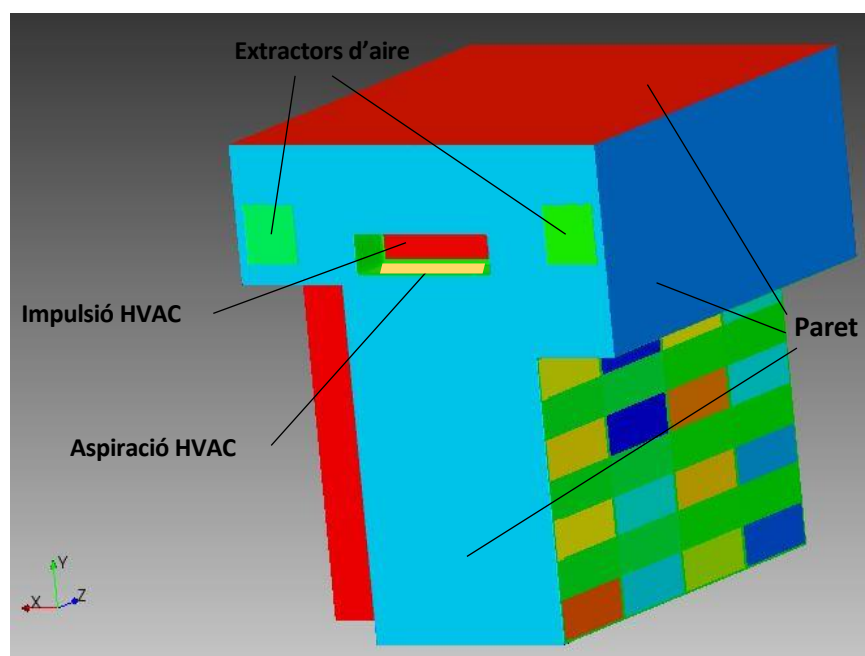


Figura 5.11. Domini a simular amb la denominació dels diferents contorns (B).

Durant la realització de les simulacions s'han realitzat petits estudis on s'han analitzat diferents condicions de contorn per veure quines eren les que garantien una millor convergència i uns resultats més realistes. En les primeres simulacions es va decidir treballar amb velocitats en les entrades i pressions en les sortides del domini (l'estança), però la convergència no era bona i els models acabaven parant-se perquè les velocitats assolien valors molt elevats i poc realistes en diferents punts de la malla. Establint com a condició de contorn el cabal màssic en les entrades i sortides, la convergència dels models és bona i els resultats són realistes. Fet aquest primer estudi es decideix treballar amb cabals màssics en les diferents entrades i sortides del domini de treball. Sempre que es treballa amb cabals s'ha de garantir l'equació de continuïtat en tot el domini, es a dir, la suma de cabals màssics entrants i sortints ha de ser 0 en tot moment per que el domini no s'ompli ni es buidi.

A continuació es fa una descripció de les diferents condicions de contorn per a cada escenari.

Escenari 1

- Sortida d'aire del Rack – Tipus de contorn: patch
 Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà `flowrateInletVelocity` de valor $+ 0.3965 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ per cada una de les quatre sortides.
 Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà `fixedFluxPressure`.
 Turbulència: Al ser una entrada de fluid pel domini cal indicar un valor per a la viscositat cinemàtica turbulenta. La condició de contorn serà `fixedValue` de valor $0.003 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.
 Temperatura: La temperatura de sortida del Rack dependrà de la temperatura de l'aire a l'entrada del Rack. El tipus de condició de contorn serà `groovyBC` on s'establirà l'expressió $T_{\text{sortida}} = 3.76 + T_{\text{entrada}}$.
- Entrada d'aire al Rack - Tipus de contorn: patch
 Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà `flowrateInletVelocity` de valor -0.099125 per cada una de les 16 entrades.
 Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà `fixedFluxPressure`.
 Turbulència: Al ser una sortida de fluid pel domini la condició de contorn serà `zeroGradient`.
 Temperatura: Es calcula a partir del flux. La condició de contorn és `zeroGradient`.
- Parets i sostre - Tipus de contorn: wall
 Velocitat: Condició de no lliscament.
 Pressió: Es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà `fixedFluxPressure`.

Turbulència: A les parets la viscositat cinemàtica turbulenta s'estableix a $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ i el tipus de condició de contorn és fixedValue.

Temperatura: S'estableix una transferència de calor. El tipus de condició de contorn és compressible::turbulentHeatFluxTemperature de valor $-4.6778 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

- Terra - Tipus de contorn: wall

Velocitat, pressió i turbulència igual que en la resta de parets.

Temperatura: S'estableix una temperatura fixa del terra. La condició de contorn és fixedValue de valor $297.15 \text{ }^\circ\text{K}$.

- Inicialització del camp:

Velocitat: $0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pressió: 101325 Pa .

Turbulència: $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Temperatura: $297.15 \text{ }^\circ\text{K}$.

Escenari 2

- Sortida d'aire del Rack, Entrada d'aire al Rack, Parets, Sostre, Terra i Inicialització del camp.
La tipologia de les condicions de contorn són les mateixes que en l'escenari 1 però canviant els valors pels de la Taula 5.2.

- Extractors d'aire - Tipus de contorn: patch

Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà flowrateInletVelocity de valor $-0.4037 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ per cada un dels extractors.

Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà fixedFluxPressure.

Turbulència: Al ser una sortida de fluid pel domini la condició de contorn serà zeroGradient.

Temperatura: Es calcula a partir del flux. La condició de contorn és zeroGradient.

- Reixeta – Tipus de contorn: patch

Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà flowrateInletVelocity de valor $+0.8074 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ per cada una de les quatre entrades d'aire al domini.

Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà fixedFluxPressure.

Turbulència: Al ser una entrada de fluid pel domini (l'estança) cal indicar un valor per a la viscositat cinemàtica turbulenta. La condició de contorn serà fixedValue de valor $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Temperatura: L'aire que entra a l'estança per la reixeta està a una temperatura ambient de $15 \text{ }^\circ\text{C}$. El tipus de condició de contorn serà fixedValue de valor $288.15 \text{ }^\circ\text{K}$.

Escenari 3

- Sortida d'aire del Rack, Entrada d'aire al Rack, Parets, Terra i Inicialització del camp.
La tipologia de les condicions de contorn són les mateixes que en l'escenari 1 però canviant els valors pels de la Taula 5.3.
- Impulsió HVAC - Tipus de contorn: patch
Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà `flowrateInletVelocity` de valor $+ 0.5724 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà `fixedFluxPressure`.
Turbulència: Al ser una entrada de fluid pel domini (l'estança) cal indicar un valor per a la viscositat cinemàtica turbulenta. La condició de contorn serà `fixedValue` de valor $0.009 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.
Temperatura: L'HVAC impulsa aire a una temperatura de 15°C . El tipus de condició de contorn serà `fixedValue` de valor 288.15 K .
- Aspiració HVAC - Tipus de contorn: patch
Velocitat: S'estableix un cabal màssic constant com a condició de contorn. El tipus de condició de contorn serà `flowrateInletVelocity` de valor $- 0.5724 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
Pressió: Al establir la velocitat la pressió es calcula a partir del flux. El tipus de condició de contorn serà `fixedFluxPressure`.
Turbulència: Al ser una sortida de fluid pel domini la condició de contorn serà `zeroGradient`.
Temperatura: Es calcula a partir del flux. La condició de contorn és `zeroGradient`.

5.1.7. Solver a utilitzar

OpenFOAM disposa de diferents solvers estàndard segons la tipologia de problema a resoldre. Per saber quin solver s'ha d'utilitzar cal primer caracteritzar el model. Els models que s'estudiaran en aquest treball es caracteritzen pels següents punts:

- Es fa un estudi en règim transitori de la dinàmica i la temperatura de l'aire a l'interior de la BTS fins que s'assoleix un règim aproximadament estacionari.
- El fluid és aire considerat com a gas ideal i compressible sota les condicions d'estudi.
- En les condicions d'estudi el numero de March és baix (< 1).
- El flux de l'aire es considera turbulent. S'utilitzarà el model Spalar Allmaras per ser un model de turbulència d'una sola equació disminuint així el temps de càlcul.
- Es considera l'efecte buoyancy, és a dir, l'aire calent és desplaçat cap a les zones superiors del domini mentre que l'aire fred és desplaçat cap a les zones inferiors per la l'efecte de la gravetat (l'aire fred té més densitat, tendeix a posicionar-se en les zones baixes).

El solver estàndard de la llibreria OpenFOAM que millor respon a aquestes característiques en règim transitori és el **buoyantPimpleFoam**. OpenFOAM defineix aquest solver apte per estudis de ventilació i transferència de calor de fluids compressibles en règims transitoris de fluxos turbulents (*“transient solver for buoyant, turbulent flow of compressible fluids for ventilation and heat-transfer”*). S’inicia la simulació en règim transitori i quan el camp de velocitats, pressions i temperatura s’estabilitzi (no varia significativament al llarg del temps), es continuarà la simulació en règim estacionari. S’afronta la problemàtica d’aquesta forma amb la finalitat de reduir el temps de simulació. En règim estacionari les equacions de la dinàmica de fluids es simplifiquen ja que els termes dependents del temps s’anul·len fent que el temps de càlcul es redueixi significativament. La versió del solver buoyantPimpleFoam per a règim estacionari és el **buoyantSimpleFoam**.

5.2. Escenari 1. Sense ventilació forçada

5.2.1. Resum del temps de simulació

Règim transitori

En règim transitori s’han simulat 19 s durant un temps total de rellotge de 1225211 s (340.34 hores) utilitzant 8 cores.

Règim estacionari

En règim estacionari s’han simulat 3600 iteracions a partir dels resultes obtinguts de l’estudi transitori durant un temps de rellotge de 59014 s (16.39 hores) utilitzant 4 cores.

Discussió sobre el règim de la simulació

En aquest escenari després de 19 segons de simulació encara no s’ha assolit un règim estacionari per a la temperatura. En aquest escenari extrem, és difícil assolir el règim estacionari ja que no hi ha cap sistema de refrigeració que pugui fer estabilitzar la temperatura en l’estança, per tant, la temperatura augmenta de forma progressiva en un punt determinat del domini. En la Figura 5.12 i 5.13 es mostra l’evolució de la temperatura i la velocitat en funció del nombre d’iteracions en un punt col·locat a la coordenada 1.1 2.3 1.25 m del sistema de coordenades mostrat en la Figura 5.1. Es pot observar que la velocitat sí aconsegueix un règim estacionari tot i que la temperatura no.

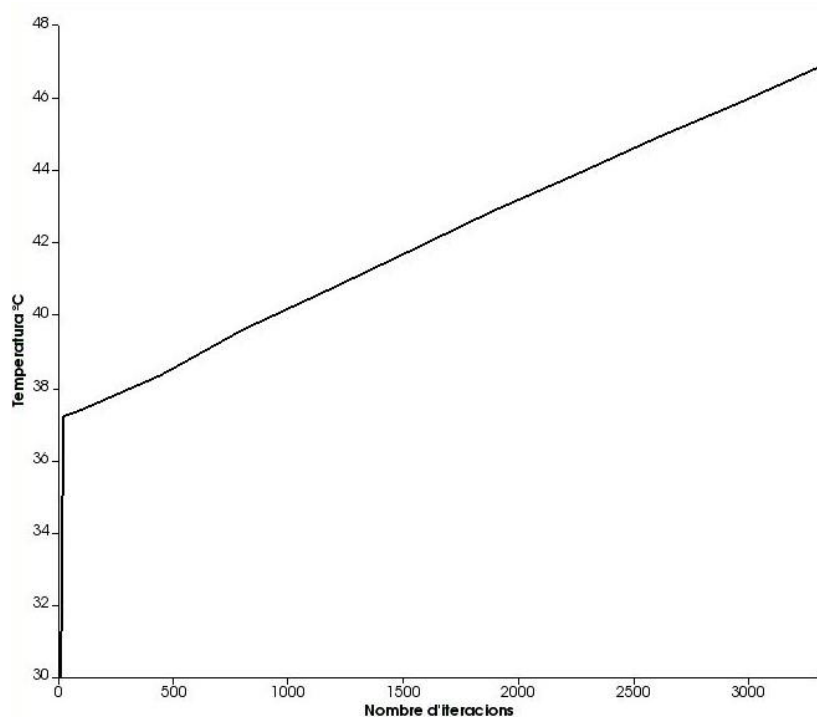


Figura 5.12. Evolució de la temperatura en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 1.

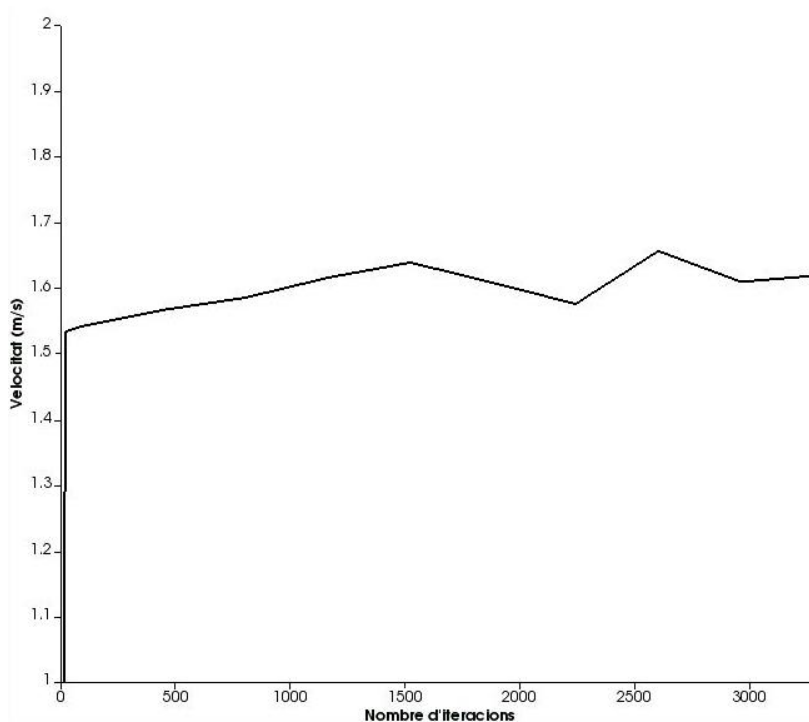


Figura 5.13. Evolució de la velocitat en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 1.

5.2.2. Distribució de temperatures

Només a nivell il·lustratiu es mostren els resultats obtinguts després de 3600 iteracions. Per a uns resultats més precisos s'hauria de realitzar una simulació completament en règim transitori. Es fa una representació dels resultats en 3 plans paral·lels a la porta de l'estança col·locats a 0.2, 0.94 i 2.3 m d'aquesta en el sentit negatiu de l'eix de les Z del sistema de coordenades del la Figura 5.1. Per cada un d'aquests plans es mostra la temperatura en 6 punts diferents A, B, C, D, E i F (l'últim correspon a la sortida d'aire en el Rack).

Pla a una distancia de 0.2 m de la porta

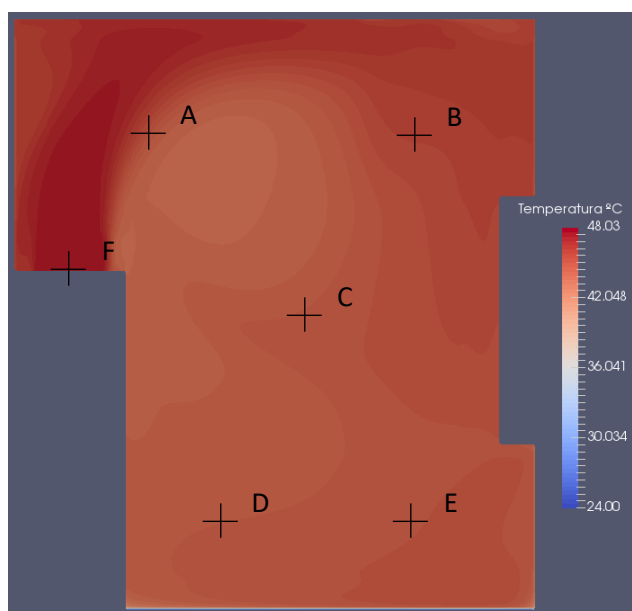


Figura 5.14. Visualització de la distribució de temperatures a 0.2 m de la porta per l'escenari 1.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.2)	(2, 2, -0.2)	(1.1, 1.25, -0.2)	(0.9, 0.5, -0.2)	(1.7, 0.5, -0.2)	(0.23, 1.44, -0.2)
Temperatura (°C)	45.64	45.45	44.22	44.18	44.54	47.62

Pla a una distancia de 0.94 m de la porta

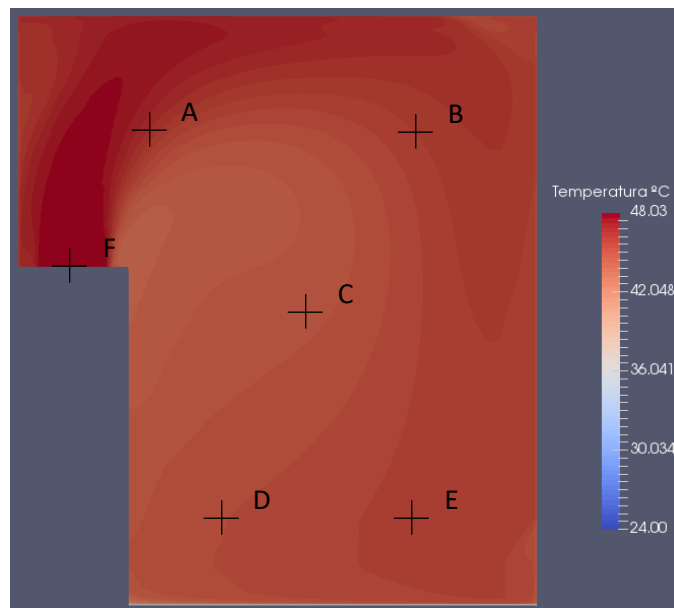


Figura 5.15. Visualització de la distribució de temperatures a 0.94 m de la porta per l'escenari 1.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.94)	(2, 2, -0.94)	(1.1, 1.25, -0.94)	(0.9, 0.5, -0.94)	(1.7, 0.5, -0.94)	(0.23, 1.44, -0.94)
Tempe. (°C)	46.85	45.78	44.45	44.99	45.53	48.02

Pla a una distancia de 2.3 m de la porta

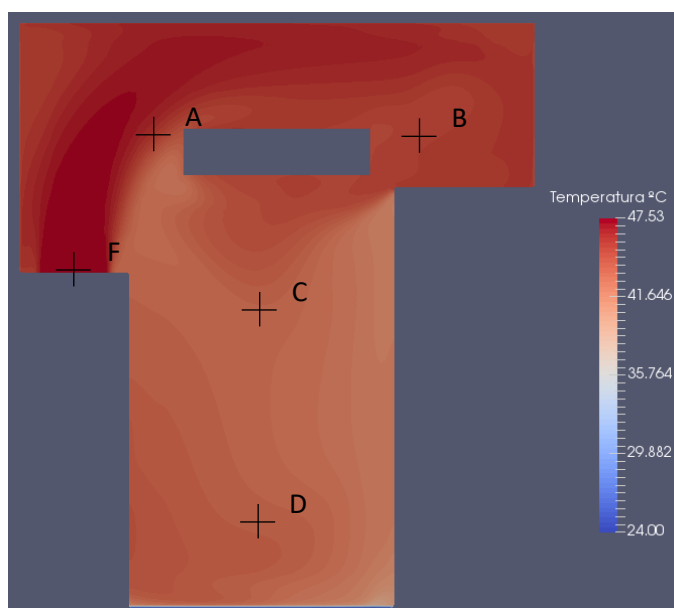


Figura 5.16. Visualització de la distribució de temperatures a 2.3 m de la porta per l'escenari 1.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -2.3)	(2, 2, -2.3)	(1.1, 1.25, -2.3)	(0.9, 0.5, -2.3)	-	(0.23, 1.44, -2.3)
Temperatura (°C)	46.39	45.19	42.94	42.97	-	47.53

5.3. Escenari 2. Amb ventilació forçada mitjançant *free cooling*

5.3.1. Resum del temps de simulació

Règim transitori

En règim transitori s'han simulat 10.7 segons durant un temps total de rellotge de 1026062 (285.02 hores) inicialitzant la simulació amb 12 i continuant-la amb 20 després dels 4.2 segons de simulació.

Règim estacionari

En règim estacionari s'han simulat 3600 iteracions a partir dels resultes obtinguts de l'estudi transitori durant un temps de rellotge de 53371 s (14.83 hores) utilitzant 4 cores.

Discussió sobre el règim de la simulació

En els gràfics de la temperatura i la velocitat en funció del nombre d'iteracions per la simulació en règim estacionari s'observa que els valors es mantenen constant per a un punt determinat del flux. es pot considerar doncs com a bona la hipòtesis de que s'assoleix el règim estacionari en 10.7 segons de simulació en règim transitori. En les Figura 5.17 i 5.18 es mostra la temperatura i la velocitat per un punt proper a la paret superior de l'estança (coordenada 1.1 2.3 -1.25 m del sistema de coordenades de la Figura 5.1).

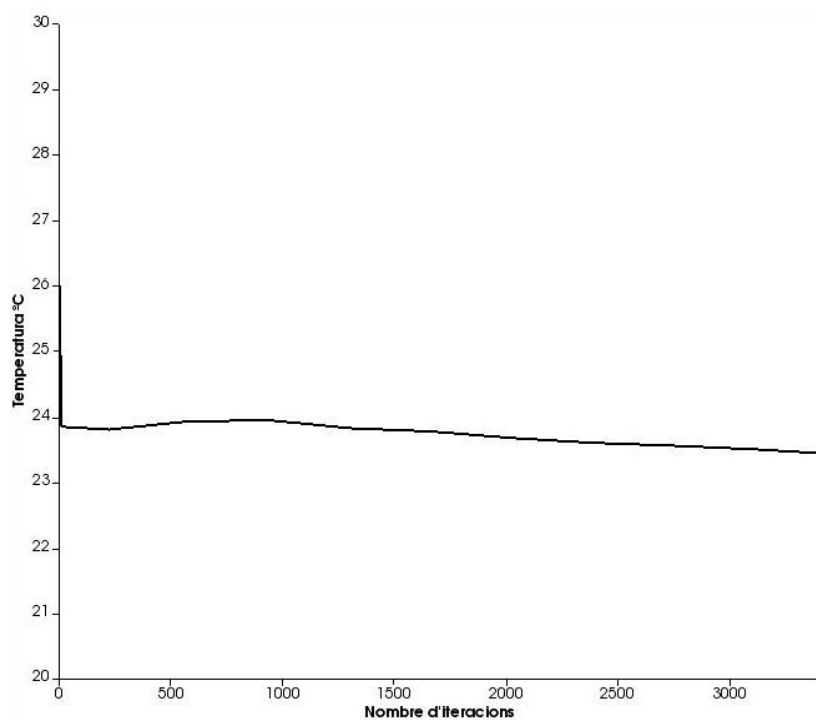


Figura 5.17. Evolució de la temperatura en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 2.

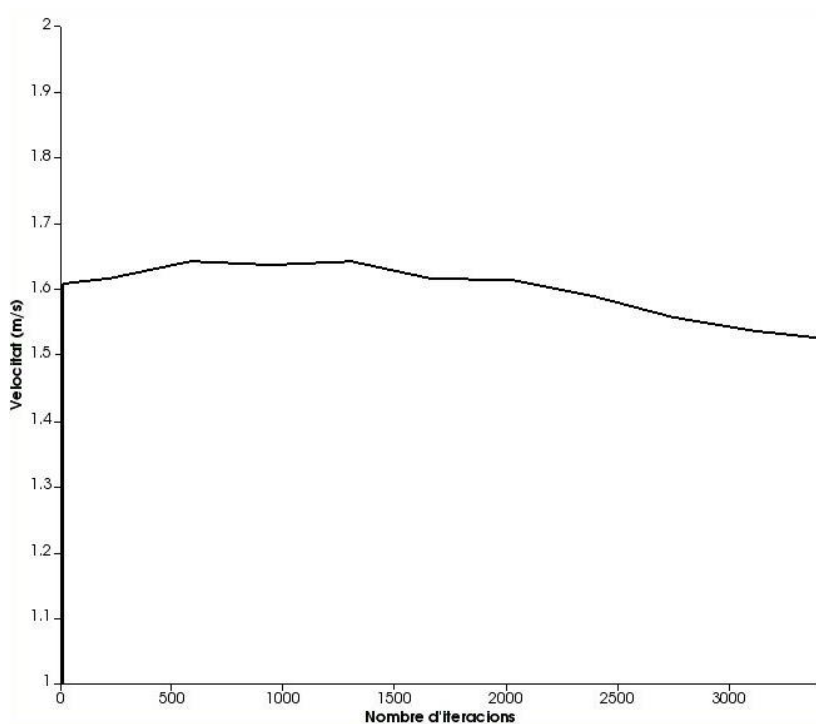


Figura 5.18. Evolució de la velocitat en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 2.

5.3.2. Distribució de temperatures

Es fa una representació dels resultats en 3 plans paral·lels a la porta de l'estança col·locats a 0.2, 0.94 i 2.3 m d'aquesta en el sentit negatiu de l'eix de les Z del sistema de coordenades del la Figura 5.1. Per cada un d'aquests plans es mostra la temperatura en 6 punts diferents A, B, C, D, E i F (l'últim correspon a la sortida d'aire en el Rack).

Pla a una distancia de 0.2 m de la porta

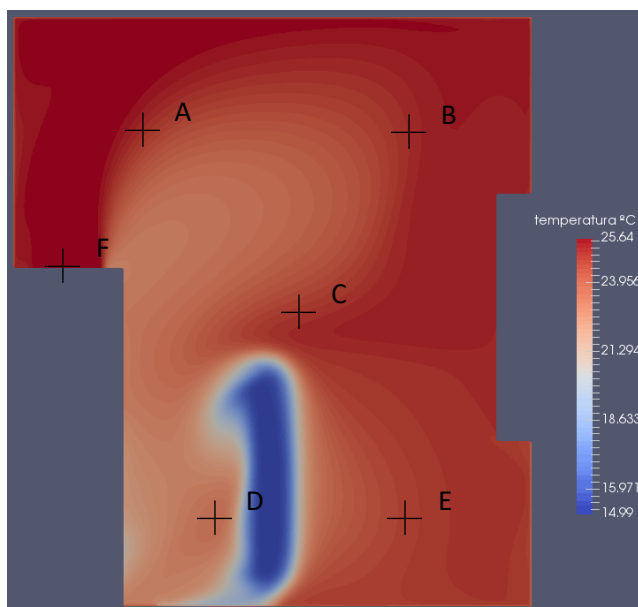


Figura 5.19. Visualització de la distribució de temperatures a 0.2 m de la porta per l'escenari 2.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.2)	(2, 2, -0.2)	(1.1, 1.25, -0.2)	(0.9, 0.5, -0.2)	(1.7, 0.5, -0.2)	(0.23, 1.44, -0.2)
Temperatura (°C)	24.96	24.68	24.69	20.23	24.69	25.54

Pla a una distancia de 0.94 m de la porta

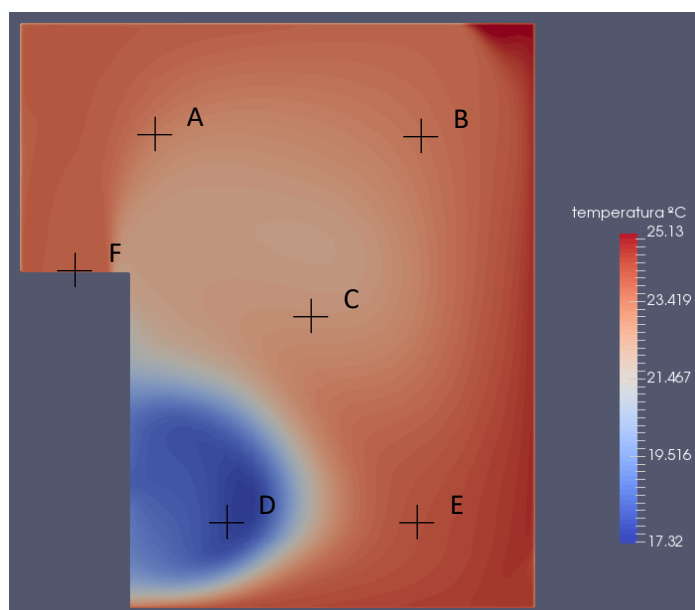


Figura 5.20. Visualització de la distribució de temperatures a 0.94 m de la porta per l'escenari 2.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.94)	(2, 2, -0.94)	(1.1, 1.25, -0.94)	(0.9, 0.5, -0.94)	(1.7, 0.5, -0.94)	(0.23, 1.44, -0.94)
Tempe. (°C)	23.00	23.08	22.25	17.36	23.63	23.60

Pla a una distancia de 2.3 m de la porta

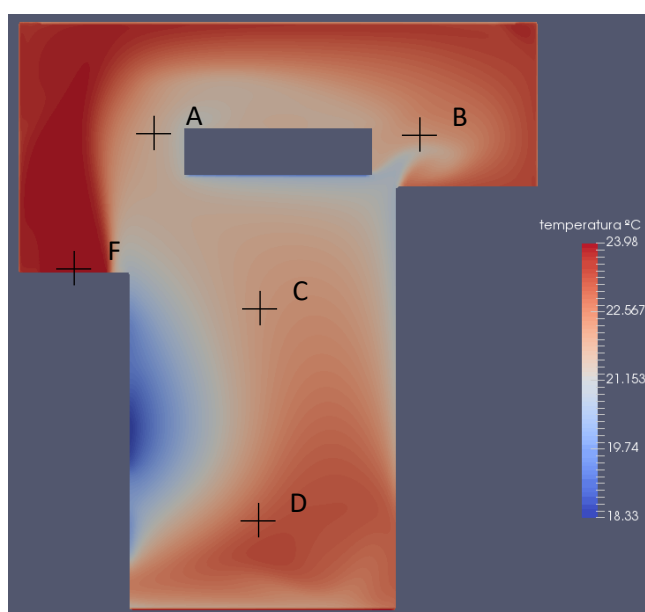


Figura 5.21. Visualització de la distribució de temperatures a 2.3 m de la porta per l'escenari 2.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -2.3)	(2, 2, -2.3)	(1.1, 1.25, -2.3)	(0.9, 0.5, -2.3)	-	(0.23, 1.44, -2.3)
Temperatura (°C)	21.49	21.36	21.92	22.74	-	23.82

5.4. Escenari 3. Amb ventilació forçada mitjançant l'equip d'HVAC

5.4.1. Resum del temps de simulació

Règim transitori

En règim transitori s'han simulat 17.5 segons durant un temps total de rellotge de 1802435 s (500.68 hores) inicialitzant la simulació amb 8.

Règim estacionari

En règim estacionari s'han simulat 3600 iteracions a partir dels resultes obtinguts de l'estudi transitori durant un temps de rellotge de 65645 s (18.23 hores) utilitzant 4 cores.

Discussió sobre el règim de la simulació

En els gràfics de a temperatura i la velocitat en funció del nombre d'iteracions per la simulació en règim estacionari s'observa que els valors es mantenen constant per a un punt determinat del flux. es pot considerar doncs com a bona la hipòtesis de que s'assoleix el regim estacionari en 17.5 segons de simulació en règim transitori.

5.4.2. Distribució de temperatures

En els gràfics de a temperatura i la velocitat en funció del nombre d'iteracions per la simulació en règim estacionari s'observa que els valors es mantenen constant per a un punt determinat del flux. es pot considerar doncs com a bona la hipòtesis de que s'assoleix el regim estacionari en 17.5 segons de simulació en règim transitori. En les Figura 5.22 i 5.23 es mostra la temperatura i la velocitat per un punt proper a la paret superior de l'estança (coordenada 1.1 2.3 -1.25 m del sistema de coordenades de la Figura 5.1).

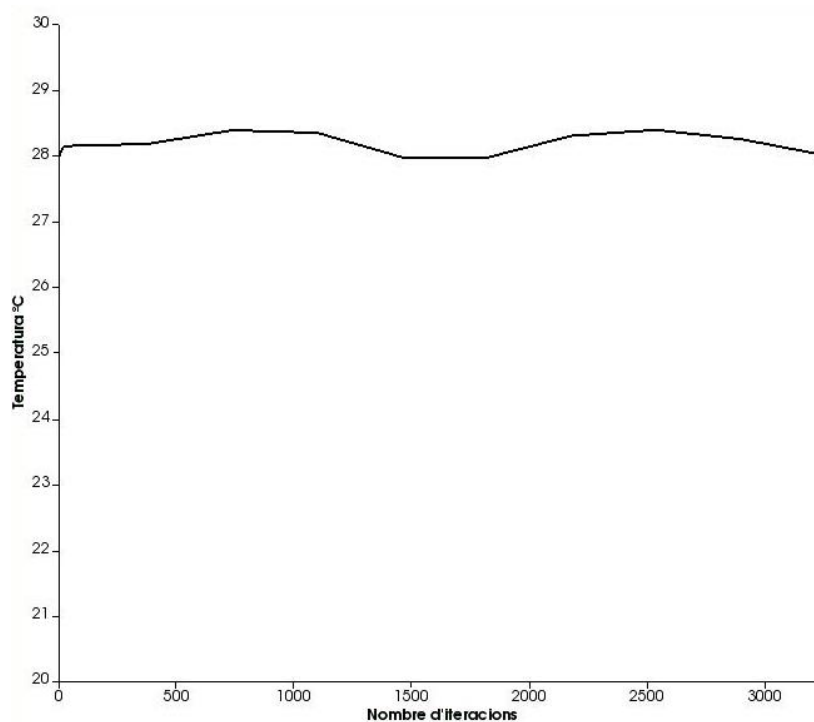


Figura 5.22. Evolució de la temperatura en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 3.

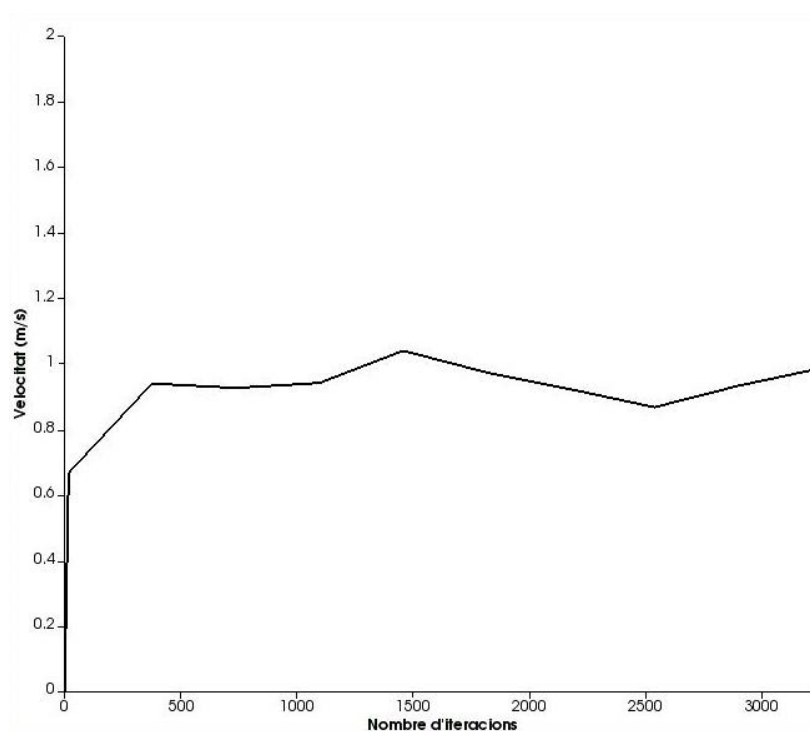


Figura 5.23. Evolució de la velocitat en funció del nombre d'interaccions en la coordenada 1.1 2.3 -1.25 m per a l'escenari 3.

Pla a una distancia de 0.2 m de la porta

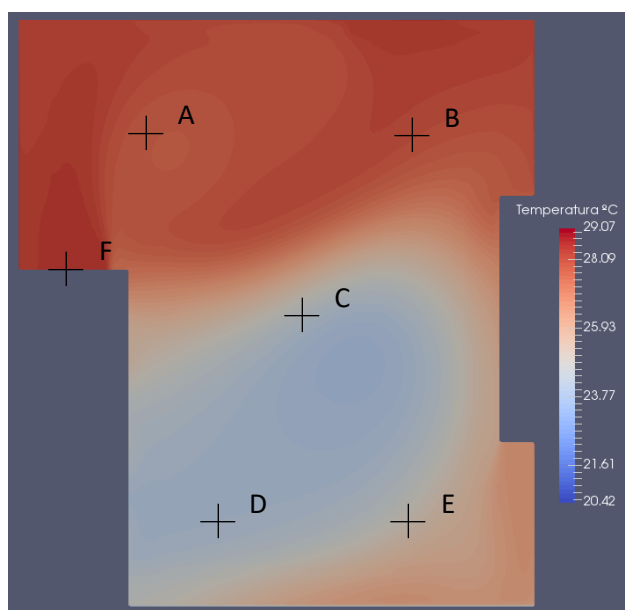


Figura 5.24. Visualització de la distribució de temperatures a 0.2 m de la porta per l'escenari 3.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.2)	(2, 2, -0.2)	(1.1, 1.25, -0.2)	(0.9, 0.5, -0.2)	(1.7, 0.5, -0.2)	((0.23, 1.44, -2.3)
Temperatura (°C)	27.78	27.99	24.74	23.89	24.67	28.47

Pla a una distancia de 0.94 m de la porta

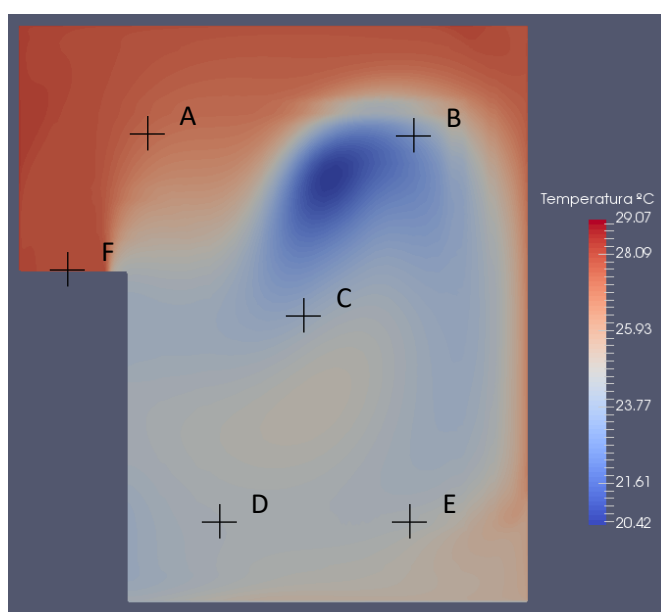


Figura 5.25. Visualització de la distribució de temperatures a 0.94 m de la porta per l'escenari 3.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -0.94)	(2, 2, -0.94)	(1.1, 1.25, -0.94)	(0.9, 0.5, -0.94)	(1.7, 0.5, -0.94)	(0.23, 1.44, -2.3)
Temperatura (°C)	27.32	22.64	23.57	24.50	24.17	27.92

Pla a una distancia de 2.3 m de la porta

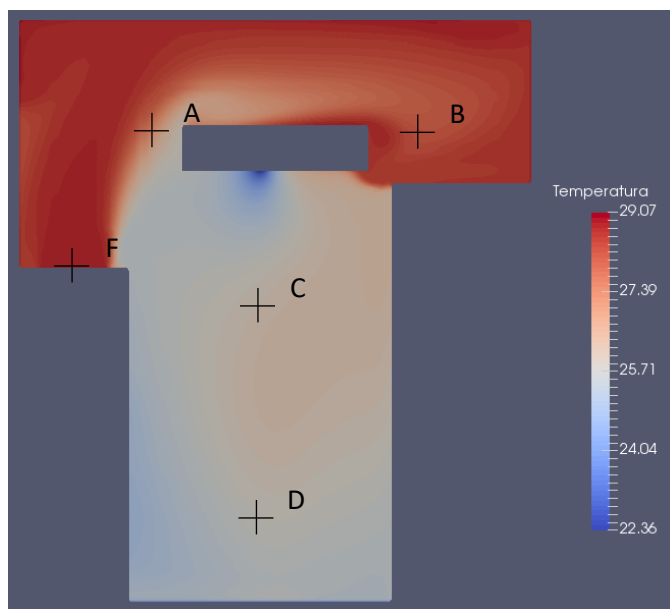


Figura 5.26. Visualització en ParaView de la distribució de temperatures a 2.3 m de la porta per l'escenari 3.

	Punt A	Punt B	Punt C	Punt D	Punt E	Punt F
Coordenada	(0.5, 2, -2.3)	(2, 2, -2.3)	(1.1, 1.25, -2.3)	(0.9, 0.5, -2.3)	-	(0.23, 1.44, -2.3)
Temperatura (°C)	27.84	28.22	26.00	25.85	-	28.79

6. Anàlisi de l'impacte ambiental

Segons la Guia Pràctica pel Càlcul d'Emissions de Gasos amb Efecte d'Hivernacle (GEH) presentada per l'Oficina Catalana de Canvi Climàtic a març del 2017, per a la realització d'aquest treball s'han alliberat gasos d'efecte hivernacle. S'utilitzarà l'apartat 2.1 d'aquesta guia per calcular les emissions de CO₂ equivalent resultat del consum elèctric dels diferents ordinadors utilitzats. Es fa una aproximació del consum elèctric basada en la potencia de disseny tèrmic dels processadors (TDP, Thermal Design Power). A aquest consum se li sumarà un suplement del 30% per el sistema de refrigeració dels processadors.

Ordinador	Consum mig per processador, TDP (W)	Nombre de processadors	Hores
Personal: i5-5200U de 2 cores	15	1	600
Recursos UPC: i7-6700 de 4 cores	65	1	300
Recursos UPC: AMD Opteron 6140 de 8 cores	115	4	1350
Consum processadors			649.5 kWh
Refrigeració			30%
Consum total			844.35 kWh

Suposant que l'electricitat consumida no prové d'energies renovables (la companyia elèctrica no disposa del certificat GdO) s'aplica el mix de producció bruta d'energia elèctrica general per a l'any 2016 de 308 g de CO₂ per kWh.

Per la realització d'aquest treball s'estimen unes emissions de CO₂ equivalent de 308 gCO₂·kWh⁻¹ x 844.35 kWh = **260.06 kg CO₂**.

Conclusions

En l'escenari en que no hi ha cap element mecànic funcionant per a la refrigeració de l'estança era d'esperar que les temperatures augmentessin per cada instant de temps ja que no hi ha cap sistema de refrigeració per estabilitzar la temperatura. L'estança esta degudament aïllada fent que la transferència de calor a través de les parets tampoc pugui frenar aquest augment de temperatura a l'interior. A conseqüència d'això, la naturalesa del problema fa que es tingui que afrontar realitzant una estudi totalment en règim transitori amb un cost computacional important. Cal deixar clar que aquest primer escenari no és realista ja que tot CPD necessita d'un sistema de refrigeració pel correcte funcionament dels equips.

Seguint amb l'escenari 2. on es reproduceix el sistema de climatització *free cooling*, els resultats obtinguts es consideren ben calculats. Es pot afirmar que després dels 10.7 segons de simulació en règim transitori el camp de velocitats s'ha estabilitzat degut a que en un punt fix de l'espai la velocitat es manté constant al llarg de totes les iteracions en l'estudi estacionari (Figura 5.18). Llavors, en aquest instant és correcte iniciar una simulació en règim estacionari per arribar a unes condicions estables de temperatura. En aquesta configuració de climatització (només recomanable per a situacions en que l'entalpia de l'aire a l'exterior sigui menor que l'entalpia de l'aire que es vol refrigerar) l'aire fresc de l'exterior a 15 °C entra per la reixeta de la porta que es troba en la part inferior del CPD i ràpidament és atret per les entrades d'absorció d'aire dels Racks, les quals també es troben a la part inferior de l'estança. Aquesta configuració fa que la temperatura de l'aire absorbit i alliberat pels Racks sigui favorable pel bon funcionament d'aquests. La temperatura d'absorció va dels 17 als 23 °C i la d'impulsió va dels 23.5 als 25.5 °C, depenent de la posició del Rack. El Rack que treballa a unes condicions de temperatura més altes és l'adjacent a la paret de la porta, el qual allibera aire a 25.5 °C. Aquest Rack no acaba d'aprofitar l'aire entrant per la reixeta de la porta ja que es troba molt a prop i entra a una velocitat més alta ($3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) que la velocitat d'absorció dels Racks ($0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Les temperatures màximes s'originen a la part superior de l'estança i s'accentuen més en les zones properes a les sortides d'aire calent dels Racks.

Quan s'utilitza l'equip d'HVAC per a la climatització del CPD s'assegura, igual que en el *free cooling*, que després d'un període de temps s'assoleix el règim estacionari. En aquest cas s'han simulat 17.5 segons en règim transitori i s'ha seguit en règim estacionari. Les figures 5.22 i 5.23 mostren que afectivament el règim es estacionari i que per tant els resultats es poden considerar ben calculats. En aquesta configuració de climatització l'aire fresc a 15 °C impulsat per l'equip d'HVAC es dirigeix cap a la zona inferior de l'estança atret per les entrades d'aire dels Racks i la mateixa entrada d'aire de l'equip d'HVAC. Per tant, l'aire va cap a les regions inferiors deixant un espai important en la part superior de l'estança (veure Figura 5.24, 5.25 i 5.26) on la refrigeració no és efectiva i les

temperatures es mantenen altes (de 27 a 28 °C). Una solució per aquest problema seria posicionar l'equip d'HVAC a una posició superior, per exemple l'entrada d'aquest podria estar col·locada a 2.15 m del terra (actualment es troba a 1.9 m). Pel que fa a les temperatures en els Racks, la temperatura d'absorció va dels 24.50 als 26 °C mentre que les d'impulsió d'aire calent van dels 27.5 als 29 °C.

Al comparar el *free cooling* i l'ús de l'equip d'HVAC per a la climatització del CPD, s'observa un rang menor de temperatures en el primer tot i que cal pensar que en aquest s'ha suposat unes condicions d'hivern i en el segon unes d'estiu on la temperatura inicial de l'estança són 26 i 28, respectivament. També cal destacar que a l'estiu (condició de temperatura exterior de 30 °C) la única configuració viable de les analitzades és l'ús de l'equip d'HVAC ja que el *free cooling* no donaria bons resultats per les altes temperatures de l'exterior. Per a l'hivern la configuració més econòmica seria el *free cooling*.

El numero d'hores de càlcul mostra l'alt cost computacional de l'estudi realitzat. Aquest estudi podria ser optimitzat generant unes malles més eficients reduint el numero de cel·les actuals de 3.5, 3.4 i 3.6 per l'escenari 1, 2 i 3, respectivament. Unes malles amb menys cel·les i més eficients (refinaments més localitzats), podrien millorar els resultats obtinguts al mateix temps que es reduiria el temps de càlcul.

Al finalitzar aquest treball l'estudiant ha adquirit uns coneixement basics sobre OpenFOAM que el doten d'una base per seguir aprenent més sobre aquesta eina lliure, accessible per a tothom i amb un gran potencial per resoldre un ampli ventall de problemes de la mecànica de fluid i la transferència de calor. Un dels inconvenients de començar a treballar amb aquesta llibreria és que no ve acompanyada d'una interfície gràfica on l'usuari pugui interaccionar de forma intuïtiva. En OpenFOAM es treballa amb arxius de text dels quals les aplicacions i els solvers llegeixen les dades introduïdes per l'usuari per després executar els codis C++ per dur a terme les tasques. Durant els primers estudis realitzats en aquest treball s'ha treballat totalment amb la interfície gràfica d'usuari Helyx-OS, la qual també és lliure i accessible per a tothom tot i que no hi ha documentació oficial per aprendre a utilitzar-la ni suport tècnic gratuït. L'estudiant admet que la interfície és molt útil quan no es té cap coneixement sobre com es treballa amb OpenFOAM ja que és molt intuïtiva, però si es vol una millor flexibilitat i aprofitar al màxim les possibilitats que ofereix la llibreria, es recomana treballar paral·lelament amb els arxius de text de OpenFOAM. Un exemple és quan un ha creat una malla, obté uns resultats i després vol aprofitar els mateixos resultats per iniciar el flux en un altre malla. OpenFOAM ofereix una aplicació anomenada mapFields que permet inicialitzar un camp a partir dels resultats d'un altre estudi mentre que en la interfície HelyxOS no apareix aquesta aplicació. La part més positiva de HelyOS és que facilita la creació de geometries i malles d'una forma més intuïtiva i interactiva ja que ve acompanyada d'un visualitzador de geometries i malles.

Anàlisi Econòmica

Mà d'obra

Per aquest treball es farà una valoració econòmica basada en el cost total del temps invertit en cada una de les etapes. Sobre el cost per hora de treball s'afegirà l'Impost sobre el Valor Afegit (IVA) del 21 %. A continuació es mostra un desglossament del nombre d'hores dedicades a cada part del treball.

	Hores
Estudi de la problemàtica i documentació	80
Aprenentatge OpenFOAM i Helyx-OS	200
Preparació dels models	150
Control de les simulacions	40
Redacció de la memòria	125
	595

El preu per hora d'una consultoria d'enginyeria per a la realització d'aquest treball s'estima en uns 40 €·h⁻¹, el cost total de mà d'obra serà de 595 h x 40 €·h⁻¹ x 1.21 = **28798 €**

Consum elèctric

Es fa una valoració econòmica del consum elèctric tot i que el cost del consum elèctric sigui poc significatiu en comparació amb el cost de mà d'obra. Només es calcula el cost del consum elèctric i l'IVA del 21%, no es tenen en comte altres costos com són el lloguer d'equips, potencia contractada ni l'impost sobre l'electricitat.

El consum elèctric és el mateix que s'ha desglossat en l'apartat de l'Anàlisi de L'impacte Ambiental d'aquest treball. Per fer una estimació del cost es suposa un preu mig del kWh de 0.10 €.

El cost aproximat del consum elèctric ha set de 0.10 €·kWh⁻¹ x 844.35 kWh x 1.21 = **102.17 €**

Bibliografia

1. Christopher J. Greenshields. *OpenFOAM User Guide version 4.0*. OpenFOAM Foundation Ltd, 2016 [Consulta: 2 febrer 2017; 13:22 CET]. Disponible a: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>.
2. Craig W. Somerton. *Ideal Gas Property Tables in SI Unit*. East Lansing: Department of Mechanical Engineering Michigan State University, primavera 2012 [Consulta: 4 abril 2017; 10:20 CET]. Disponible a: <http://www.egr.msu.edu/classes/me201/somerton/IdealGasTables.pdf>
3. Fluent Inc. *FLUENT 6.0 User's Guide*. Lebanon: Fluent inc. December 2001 [Consulta: 23 febrer 2017; 18:45 CET]. Disponible a: <http://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/>
4. Fumiya Nozaki (fumiya). "buoyantPimpleFoam and buoyantSimpleFoam in OpenFOAM". A: *Caefn* [en línia]. 6 març 2016; [Consulta: 10 abril 2017; 14:22 CET]. Disponible a: <http://caefn.com/openfoam/solvers-buoyantpimplefoam>
5. Ganesh Visavale (Ganesh Visavale). "Introduction to Turbulence and Turbulence Modeling". A: *LearnCAX* [en línia]. 15 març 2016; [Consulta: 2 març 2017; 17:20 CET]. Disponible a: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/introduction-to-turbulence-modelling>
6. Gerhard Holzinger. *OpenFOAM A little User-Manual*. Àustria: Johannes Kepler University, març 2017 [Consulta: 1 maig 2017; 19:41 CET]. Disponible a: https://github.com/ParticulateFlow/OSCCAR-doc/blob/master/openFoamUserManual_PFM.pdf.
7. H.K. Versteeg & W. MALALASEKERA. *Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Edimburg: Pearson Education Limited, 2007. ISBN: 9780131274983
8. John F. Wendt. ed. 3. *Computational Fluid Dynamics. An introduction*. Berlin: Springer, 2009. ISBN: 9783540850557
9. Micael J. Moran i Howard N. Shapiro. ed 2. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A. 2004. ISBN: 8432183130
10. Moreland K. *Paraview tutorial*. ed 4.4. Sandia National Laboratories [Consulta: 14 maig 2017; 17:15 CET]. Disponible a: <http://www.paraview.org/Wiki/images/5/56/ParaViewTutorial44.pdf>
11. OpenFOAM Foundation. Official OpenFOAM Repository. A: GitHub [en línia]. Regne Unit: 16 juny 2015 [Consulta: 22 maig 2017; 17:20 CET]. Disponible a: <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-2.3.x/tree/master/src>
12. Salim .M. Salim, and S.C. Cheah. *Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows*. Hong Kong: IMECS , March 2009. ISBN: 9789881701275

13. Vijay Mali i Sanket Dange (Vijay Mali). "Basics of Y Plus, Bounadry Layer and Wall Function in Turbulent Flows". A: *LearnCAx* [en línia]. 25 juliol 2016; [Consulta: 2 març 2017; 19:15 CET]. Disponible a: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows#comments>
14. Yunus A. Çengel i John M. Cimbala. *Mecánica de Fluidos. Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw-Hill Companies, 2006. ISBN: 9701056124

Annex A

A1. Malles dels tres escenaris estudiats

Escenari 1

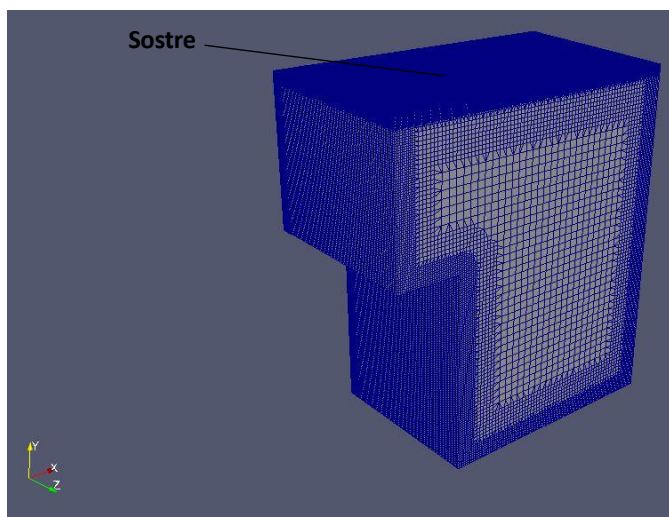


Figura A.1. Malla a un pla col·locat paral·lelament a 1.25 m de la porta de l'estança.

Escenari 2

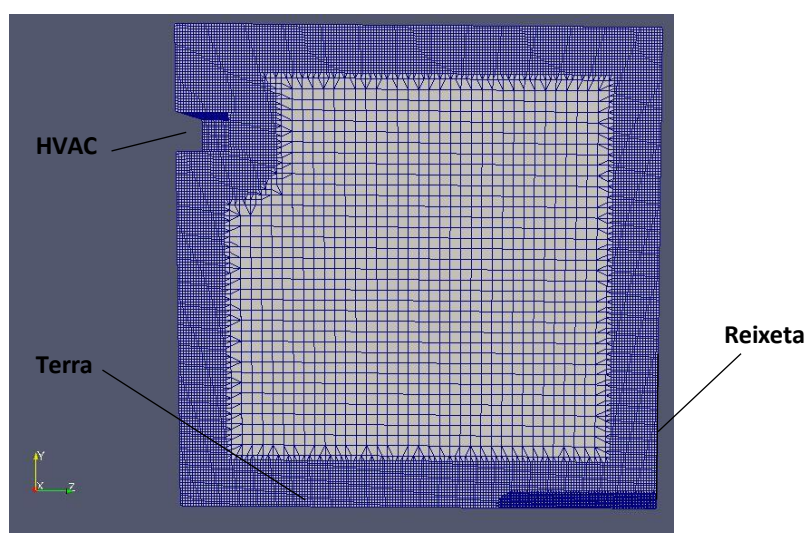


Figura A.2. Malla en un pla que secciona l'estança pel centre de la reixeta de la porta per on entra l'aire en el *free cooling*. S'observa un major refinament en la regió del terra propera a la reixeta.

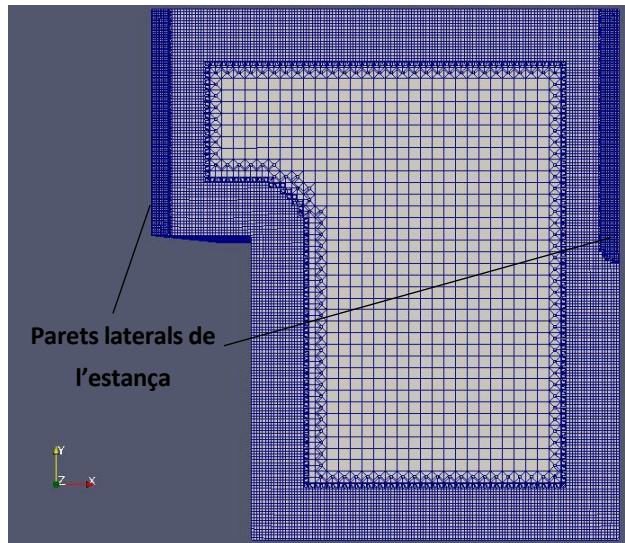


Figura A.3. Malla en un pla col·locat a 1.5 m de la porta. Es pot observar un major refinament en les parets laterals de l'estança les quals són adjacents als extractors d'aire.

Escenari 3

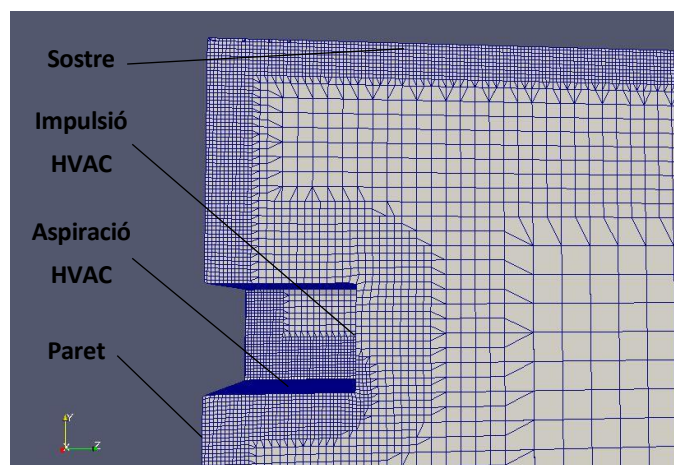


Figura A.4. Ampliació de malla en un pla que secciona l'estança pel centre de l'equip d'HVAC. S'observa un major refinament en la paret que suporta l'equip d'HVAC, l'aspiració d'aquest i el sostre de l'estança.